Ve618.fm Page 1 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

6

2018

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(499)-269-52-98
Факс: 8-(499)-269-48-97

Адрес редакции:

107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(495)-661-38-80.
E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru
www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за ПИ № 77-12421 в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Учредитель: А.И. Савкин

Индекс: **27841** ("Пресса России")
Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер",
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.
Сайт: **www.aov.ru**

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, **Алешин Н.П.,** д-р техн. наук, акад. РАН, **Братухин А.Г.,** д-р техн. наук, **Воронцов А.Л.,** д-р техн. наук, **Гусейнов А.Г.,** д-р техн. наук, **Дмитриев А.М.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), **Драгунов Ю.Г.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Древаль А.Е.,** д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), **Кутин А.А.,** д-р техн. наук, **Омельченко И.Н.,** д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), **Кузин В.В.,** д-р техн. наук, **Попов Д.Н.,** д-р техн. наук, **Попов А.В.,** д-р техн. наук, **Рыбин В.В.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Трегубов Г.П.,** д-р техн. наук, **Сычев А.П.,** канд. физ.-мат. наук, **Скугаревская Н.В.** (ответственный секретарь)

Ve618.fm Page 2 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Рязанов А. И. — Автоматизация процесса 3D-моделирования сложнопрофильных деталей МГТД . . . 3

Каракулов М. Н., Мельников А. С. — Расчеты на прочность элементов замыкания кинематической связи в плунжерных передачах . . . 7

Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. — Влияние вибрационных нагрузок на перекос тел качения в игольчатом подшипнике карданного шарнира . . . 10

Шишкарев М. П. — Экономические аспекты применения предохранительных фрикционных муфт . . . 15

Ахатов Р. Х., Однокурцев К. А., Зыкова Е. В. — Технология роботизированного позиционирования при сборке и монтаже конструкций . . . 23

Шалобаев Е. В., Демина А. С. — Способ повышения надежности крупного высокооборотного оборудования . . . 29

Бровман М. Я. — Усовершенствование технологии изготовления трубопроводов для транспортировки газов и жидкостей . . . 32

Рызванович А. Я., Шмулевский Д. Б. — Анализ способов регулирования крутильных колебаний виброприводов шпинделя . . . 38

Крыхтин Ю. И., Карлов В. И. — Физические основы разработки заготовок дисков трения с бронзовым покрытием для трансмиссий транспортных машин . . . 42

Базров Б. М. — Технологичность конструкции изделия и ее оценка . . . 47

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Киселев А. В., Желонкин М. В., Головин А. А. — Автономная интеллектуальная робототехническая система диагностики магистральных газо- и нефтепроводов с применением беспилотных летательных аппаратов для Арктики и Крайнего Севера . . . 51

Димов Ю. В., Подашев Д. Б. — Исследование сил взаимодействия эластичного абразивного круга с обрабатываемой заготовкой . . . 54

Гадалов В. Н., Емельянов С. Г., Филатов Е. А., Макарова И. А., Сальников В. Г. — Диффузионное борирование доэвтектоидных инструментальных сталей. Технологии, структуры, фазовые составы и свойства материалов . . . 60

Албагачиев А. Ю., Красько А. С., Баранова Н. С., Страмцова Е. С., Мокану А. А. — Перспективы применения электронно-лучевой плавки при изготовлении деталей газотурбинных двигателей . . . 67

Толочко Н. К., Челединов А. Н. — Кинетические закономерности ультразвуковой очистки деталей машин от загрязнений . . . 69

Проблемы теории и практики резания материалов

Большаков А. Н. — Серия статей по теории прерывистого резания. 5. Разработка схемы резания для зоны входа режущего клина в заготовку . . . 74

Полянский С. Н., Бутаков С. В., Мальцев Л. В., Ольков И. С., Попов М. А., Александров В. А. — Резка и раскрой слябов и толстых плит из сплавов титана . . . 78

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Краев В. М., Тихонов А. И., Новиков С. В. — Импортозамещающие производства авиационных двигателей в России . . . 82

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Комаишко С. Г., Кулик Г. Н., Суздаль К. В., Тимофеев А. В. — Технологическая наследственность в машиностроении. Часть 2 . . . 86

CONTENTS

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Ryazanov A. I. — Automation of 3D-modeling process of complex parts of micro-gas turbine engines 3

Karakulov M. N., Mel'nikov A. S. — Strength analyses of closure elements of kinematic coupling in plunger gears 7

Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. — Influence of vibration loads on skew motion of rolling elements in needle bearing of cardan joint 10

Shishkarev M. P. — Economic aspects of application of safety friction clutches 15

Akhatov R. Kh., Odnokurtsev K. A., Zykova E. V. — Robotic positioning technology for assembling and installation of structures 23

Shalobaev E. V., Demina A. S. — Method of reliability increase of large high-speed equipment 29

Brovman M. Ya. — Improvement of manufacturing technology of pipelines for transportation of gases and liquids 32

Ryzvanovich A. Ya., Shmulevskiy D. B. — Analysis of regulation methods of torsional oscillations of spindle vibration drives 38

Krykhtin Yu. I., Karlov V. I. — Physical basis for development of friction disc billets with bronze coating for transmissions of transport vehicles 42

Bazrov B. M. — Product design manufacturability and its evaluation 47

MANUFACTURING ENGINEERING

Kabaldin Yu. G., Shatagin D. A., Kiselev A. V., Zhelonkin M. V., Golovin A. A. — Autonomous intellectual robotic system for diagnostics of main gas and oil pipelines using unmanned aerial vehicles for Arctic and the Far North 51

Dimov Yu. V., Podashev D. B. — Research of interaction forces between elastic abrasive wheel and billet 54

Gadalov V. N., Emel'yanov S. G., Filatov E. A., Makarova I. A., Sal'nikov V. G. — Diffusion bonding of pre-eutectoid instrumental steels. Technologies, structures, phase compositions and properties of materials 60

Albagachiev A. Yu., Krasko A. S., Baranova N. S., Stramtsova E. S., Mokanu A. A. — Prospects of electron beam melting in manufacture of gas turbine engine parts 67

Tolochko N. K., Cheledinov A. N. — Kinetic regularities of ultrasonic cleaning of machine parts from contamination 69

Problems of theory and practice of materials cutting

Bol'shakov A. N. — A series of articles on the theory of interrupted cutting. 5. Development of cutting scheme for input zone of cutting wedge into billet 74

Polyanskiy S. N., Butakov S. V., Mal'tsev L. V., Ol'kov I. S., Popov M. A., Aleksandrov V. A. — Cutting and pattern cutting of slabs and thick plates made from titanium alloys 78

ECONOMY AND ORGANIZATION OF PRODUCTION

Kraev V. M., Tikhonov A. I., Novikov S. V. — Import-substituting production of aircraft engines in Russia 82

TECHNICAL INFORMATION

Komaishko S. G., Kulik G. N., Suzdal' K. V., Timofeev A. V. — Technological heredity in mechanical engineering. Part 2 86

Технический редактор *Т. А. Шацкая*
Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 25.04.2018. Подписано в печать 19.05.2018.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

© ООО «Издательство "Инновационное машиностроение"», "Вестник машиностроения", 2018

Ve618.fm Page 3 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 004.925.84.001.57

А. И. РЯЗАНОВ (Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева), e-mail: tr05@bk.ru

Автоматизация процесса 3D-моделирования сложнопрофильных деталей МГТД

Рассмотрен метод автоматизации геометрического моделирования сложнопрофильных деталей микрогазотурбинных двигателей в программном пакете Siemens NX. На скриптовом языке SNAP написана программа построения рабочего колеса центробежного компрессора. Применение метода позволило сократить время создания и изменения геометрии 3D CAD моделей элементов проточной части двигателя до нескольких минут.

Ключевые слова: центробежный компрессор, основная лопатка, входная кромка, газодинамический тракт, конструктивный элемент, язык программирования NX Open SNAP.

The method of automation of geometric modeling of complex profile parts of micro-gas turbine engines in the Siemens NX software package is considered. On the SNAP scripting language, the program for constructing a centrifugal compressor impeller is written. The application of the method allowed to reduce the time of creating and changing the geometry of 3D CAD models of the flowing engine parts up to several minutes.

Keywords: centrifugal compressor, main blade, input edge, gas-dynamic path, structural element, NX Open SNAP programming language.

Трехмерная компьютерная графика применяется практически на всех этапах разработки авиационного двигателя [1, 2], подготовки его производства [3—5], контроле геометрии готовых деталей [6, 7], а также в процессе восстановления изношенных областей пера лопатки методом наплавки [8, 9]. Инструментарий создания 3D-моделей в современных САПР интуитивно понятен, интерактивен и нагляден для пользователя. Однако в процессе моделирования довольно часто необходимо выполнять однотипные повторяющиеся действия [10], либо многократно перестраивать модель, варьируя ее параметрами при прочностном, газодинамическом, тепловом и других видах инженерного анализа [11]. Выполнение таких действий легко алгоритмизируется и может быть автоматизировано.

Среди множества деталей, из которых состоит микрогазотурбинный двигатель (МГТД), выделим сложнопрофильные элементы, формирующие газодинамический тракт изделия: входное и выходное устройства, лопатки компрессора и турбины, каналы между ступенями, камеру сгорания. Детали газодинамического тракта взаимодействуют с рабочим телом и оказывают прямое влияние на показатели работы двигателя. Много внимания уделяется геометрии таких деталей на этапе проектирования МГТД [12]. Их сложные пространственные поверхности формируются в результате моделирования течений и химических превращений потоков в тракте.

В отличие от геометрических примитивов фасонные поверхности нельзя однозначно определить, задав несколько размеров. Они состоят из бесконечного множества точек, лежащих в бесконечном количестве плоскостей. Поэтому на практике применяется упрощенный способ задания поверхностей газодинамического тракта. Например, объем пера рабочей лопатки осевого компрессора рассекают плоскостями, перпендикулярными вертикальной оси [10]. Каждое из сечений задается конечным набором точек, взятых с определенным шагом по оси вращения компрессора [13]. В зависимости от кривизны профиля лопатки таких точек может быть от одного до нескольких десятков. Их координаты записываются в файл результата газодинамического анализа или приводятся в виде таблиц на заводских чертежах лопаток. Этот способ упрощения задания геометрии применяется и для других элементов тракта двигателя.

Создание 3D-модели сложнопрофильной детали по координатам точек сечений традиционными средствами современных систем автоматизированного проектирования (САПР) чрезвычайно трудоемко. Требуется ввести значения координат каждой точки для каждого из сечений и соединить их сплайнами. Далее необходимо создать объем, указав последовательно все сечения.

В процессе решения задач оптимизации требуется многократно (десятки и сотни раз) пере-

Ve618.fm Page 4 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

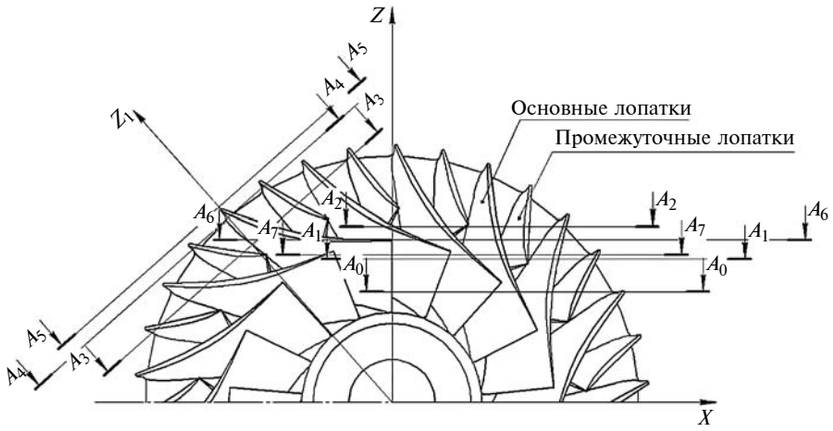


Рис. 1. Рабочие лопатки центробежного компрессора

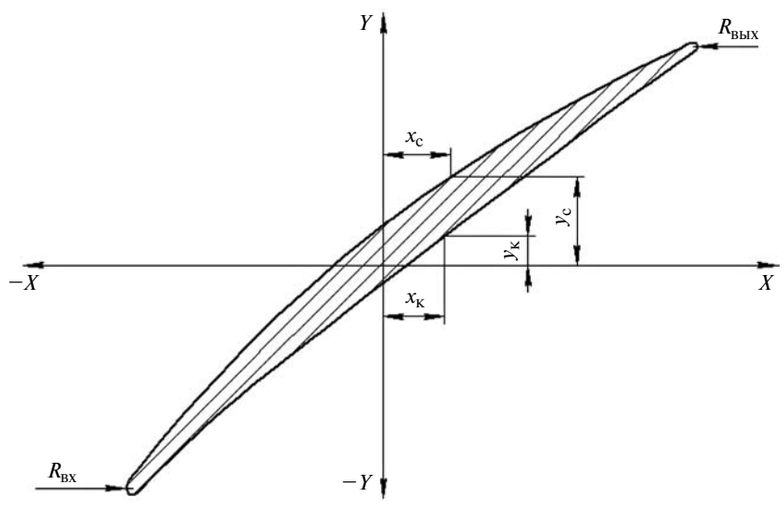


Рис. 2. Сечение пера лопатки

страивать деталь, варьируя ее геометрическими параметрами [14]. Участие человека становится необходимым только на этапе задания начальных условий задачи, диапазонов изменения параметров оптимизации и при анализе результатов по достижении экстремума целевой функции.

В Самарском университете разработан метод автоматизации процесса 3D-моделирования сложнопрофильных деталей МГТД в программном пакете Siemens NX [15]. Все геометрические построения, необходимые для моделирования детали, записываются в виде команд программного кода. В дальнейшем при выполнении программы 3D-модель создается по сохраненному алгоритму уже без участия человека.

Одним из наиболее современных инструментов создания исполняемых программ для NX является скриптовой язык SNAP (Simple NX Application Programming). SNAP создан на базе синтаксиса Basic и ориентирован в первую очередь на конструкторов и инженеров, не являющихся профессиональными программистами.

Рассмотрим метод автоматизации процесса 3D-моделирования сложнопрофильных деталей МГТД на примере моделирования рабочего колеса центробежного компрессора с помощью специально разработанной SNAP-программы. Традиционно моделирование сложнопрофильных деталей начинают с наиболее трудоемких построений фасонных поверхностей. В нашем случае таковыми являются основные и промежуточные лопатки. В результате газодинамического расчета определяется геометрия нескольких сечений (например, A_0—A_0, ..., A_5—A_5) лопатки плоскостями, перпендикулярными к ее вертикальной оси (рис. 1, 2). Сечения A_6—A_6, A_7—A_7 используются для промежуточных лопаток.

SNAP-программа запрашивает информацию из нескольких текстовых файлов данных, сформированных по результатам газодинамического расчета. Исходными данными для моделирования являются: число лопаток, число сечений, задающих геометрию основной и промежуточной лопаток, высоты расположения сечений, радиусы входных и выходных кромок, координаты точек спинок и корыт профилей соответствующих сечений лопаток.

Для построения рабочих лопаток центробежного компрессора применяют избыточное число сечений, часть из которых оказывается за пределами проточной части ступени компрессора. Поэтому часть лопатки необходимо отсечь в радиальном направлении. Для этого в файлах данных присутствуют координаты точек меридионального сечения газодинамического тракта ступени. Рабочее колесо центробежного компрессора помимо фасонных поверхностей имеет и более простую дисковую часть, размеры которой также используются в качестве исходных данных при моделировании.

После считывания информации из файлов SNAP-программа создает точки первых шести сечений основной лопатки. По точкам выполняется построение сплайнов спинок и корыт. Создаются дуги входных и выходных кромок. Для некоторых кромок

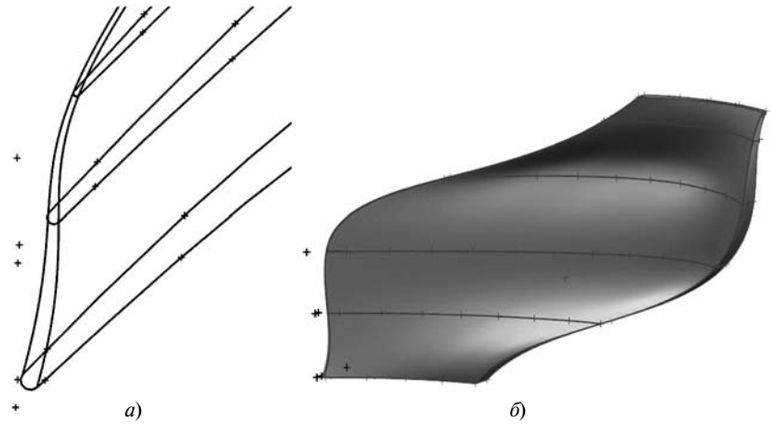
Ve618.fm Page 5 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

задано нулевое значение радиуса. Такие кромки после создания объема диска окажутся внутри его тела или за пределами проточной части. В таком случае программа соединяет крайние точки сплайнов корыта и спинки прямой линией. Процесс построения сечений полностью одинаков и записан в SNAP-программе многократно выполняемым циклом. Число повторений цикла равно числу сечений основной лопатки.

Далее создаются шесть поверхностей, ограничивающих объем пера. Такими являются поверхности спинки, корыта, входной кромки, выходной кромки и две торцевые плоские поверхности, создаваемые в крайних сечениях. Чтобы исключить разрывы в местах стыка поверхностей, проводятся несколько дополнительных сплайнов. Два сплайна проводятся по точкам перехода дуг входных кромок в сплайны спинки и корыта (рис. 3, *а*, *б*). Аналогично проводятся два сплайна, ограничивающих поверхность выходной кромки. Далее с помощью команды "Поверхность по сетке кривых" программа создает четыре боковые поверхности лопатки. Торцевые поверхности создаются командой "Ограниченная плоскость".

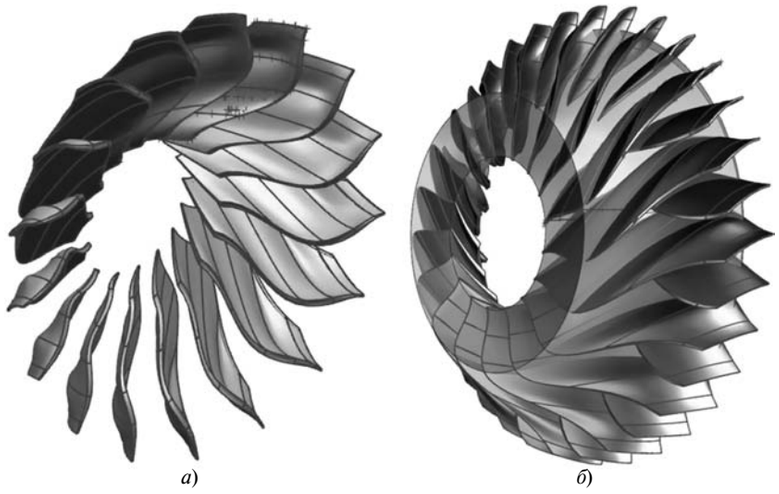
В завершение моделирования первой лопатки поверхности сшиваются в единый объем (см. рис. 3). Все команды, выполняемые по SNAP-программе, сохраняются в окне "Навигатор модели" в виде истории ее создания. Моделирование второй и последующих основных лопаток запрограммировано в многократно повторяемом цикле. Для каждой новой лопатки создается новая система координат, повернутая относительно предыдущей вокруг оси вращения компрессора на угол, равный межлопаточному шагу.

Цикл моделирования пера выполняется многократно: столько раз, сколько лопаток необходимо построить. На рис. 4, *а*, *б* приведен результат работы программы на момент завершения построения всех основных лопаток рабочего колеса.



а) *б*)

Рис. 3. Этапы создания объема пера лопатки



а) *б*)

Рис. 4. Этапы отработки SNAP-программы:

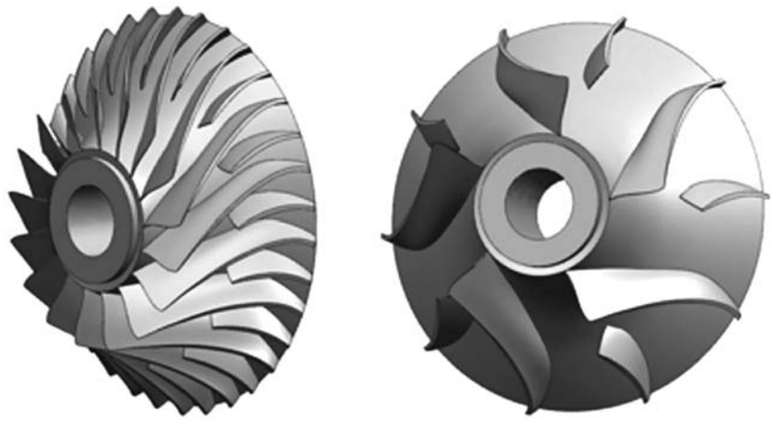
а — завершение работы цикла построения основных лопаток; *б* — создание объема проточной части, пересекающего лопатки

Промежуточные лопатки формируются аналогично основным в следующем повторяемом цикле SNAP-программы. Для моделирования пера используются два сечения: $A_6—A_6$ и $A_7—A_7$ (см. рис. 1), а также два периферийных сечения основной лопатки: $A_4—A_4$ и $A_5—A_5$.

Построив все лопатки рабочего колеса, необходимо отсечь их по периферии и втулке газодинамического тракта. Для этого создается объем проточной части (см. рис. 4, *б*) и выполняется булевая операция "Пересечение" между ним и одной из лопаток. В результате выполнения операции останется только тот объем лопатки, который находится в пределах газодинамического тракта ступени центробежного компрессора.

Булевая операция "Пересечение" может быть выполнена только с двумя объектами, поэтому необходимо многократно повторить ее для остальных лопаток. Для этого в SNAP-программе используется цикл, содержащий процедуры создания объема проточной части и его пересечения с лопаткой. При каждом новом проведении цикла последо-

Ve618.fm Page 6 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM



а) *б*)

Рис. 5. Рабочие колеса центробежного компрессора с 17 (*а*) и 5 (*б*) основными лопатками

вательно берется новая основная или промежуточная лопатка.

Выполнив усечение всех лопаток рабочего колеса, программа переходит к созданию последнего конструктивного элемента — диска. Диск является телом вращения и может быть получен на основе поперечного профиля командой "Вращение". С помощью команды "Объединение" диск соединится со всеми созданными ранее основными и промежуточными лопатками.

В завершение работы SNAP-программы удаляются все вспомогательные геометрические построения: точки, линии, сплайны и т. п. Готовая 3D CAD модель рабочего колеса центробежного компрессора с 17 основными и 17 промежуточными лопатками приведена на рис. 5, *а*.

Для полученной геометрии имеется связанное с ней дерево модели и при необходимости ее можно отредактировать вручную средствами интерфейса NX. Например, можно выполнить радиусы в углах и притупить острые кромки фасками или изменить существующие конструктивные элементы. Далее деталь можно использовать как элемент сборки или подвергнуть ее прочностному, тепловому, частотному и другим видам инженерного анализа. Также можно вносить изменения в файлы данных геометрии сечений и параметров рабочего колеса. На рис. 5, *б* показан вариант детали с пятью основными и пятью промежуточными лопатками. Для получения новой геометрии был изменен только один параметр в файле данных — число лопаток.

Программы, написанные на языке NX Open SNAP, позволяют автоматизировать процесс 3D-моделирования деталей сложной геометрии. Время моделирования новой детали сокращается до нескольких минут. После изменения исходных данных также быстро может быть получена обновленная модель. Появляется возможность рассмотреть различные конструкции и выбрать оптимальную. Существенно снижается трудоемкость при конструировании деталей микрогазотурбинных двигателей.

Предложенный метод автоматизации процесса 3D-моделирования сложнопрофильных деталей МГТД широко применяется в Самарском университете для создания рабочих лопаток осевого компрессора [13], неохлаждаемых рабочих лопаток турбины [16] и других элементов проточной части двигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Improvement** results of TK-32 turbocompressor turbine with gas-dynamics and strength CAE-systems / G. M. Popov, O. V. Baturin, D. A. Kolmakova, A. V. Krivtsov // International journal of engineering and technology. 2014. № 6 (5). P. 2297—2303.

2. **Investigation** of the effect of the gas turbine compressor supports on gas flow circumferential nonuniformity / A. I. Ermakov, A. O. Shklovets, G. M. Popov, D. A. Kolmakova // Research Journal of Applied Sciences. 2014. V. 9. Is. 10. P. 684—690.

3. **Скуратов Д. Л., Рязанов А. И., Чигринев И. А.** Технология моделирования, проектирования техпроцессов и изготовления деталей типа тел вращения на малоразмерных токарных станках с ЧПУ: Учеб. пособие. Самара: СГАУ, 2013. 110 с.

4. **Хаймович И. Н., Хаймович А. И.** Проектирование и реализация системы автоматизированного проектирования штамповки компрессорных лопаток из титановых сплавов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2015. № 2. С. 37—43.

5. **Ryazanov A. I., Shvetsov A. N.** Virtual debugging of a control program for a numerically controlled five-coordinate milling machine // Russian Engineering Research. 2016. 36 (8). P. 677—680.

6. **Pechenin V. A., Bolotov M. A., Ruzanov N. V.** Development of a method of ICP algorithm accuracy improvement during shaped profiles and surfaces control // International Journal of Engineering and Technology. 2014. 6 (5). P. 2229—2235.

7. **Pechenin V. A., Bolotov M. A., Ruzanov N. V.** Method of evaluation of profile form and shaped surfaces with application of wavelets // Research Journal of Applied Sciences. 2014. 9 (11). P. 820—824.

8. **Shitarev I. L., Smelov V. G., Sotov A. V.** Repair of a gas turbine blade tip by impulse laser build-up welding // Applied Mechanics and Materials. 2014. V. 682. P. 96—99.

9. **Restoration** of the face of a GTE blade tip by pulse laser cladding / V. A. Barvinok, V. G. Smelov, A. V. Sotov, S. A. Kosyrev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. V. 44, Is. 7. P. 658—662.

10. **Shabliy L. S., Dmitrieva I. B.** Conversion of the blade geometrical data from points cloud to the parametric format for optimization problems // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. № 9 (10). P. 1849—1853.

11. **Shabliy L. S., Dmitrieva I. B.** Blade geometry transformation in optimization problems from the point cloud to the parametric form // Russian Aeronautics (Iz. VUZ). 2014. V. 57. N. 3. P. 276—282.

Ve618.fm Page 7 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.833.6

М. Н. КАРАКУЛОВ, д-р техн. наук, А. С. МЕЛЬНИКОВ (ИжГТУ им. М. Т. Калашникова), e-mail: tmm1978@bk.ru

Расчеты на прочность элементов замыкания кинематической связи в плунжерных передачах

Рассмотрен прочностной расчет гибкого элемента для силового замыкания кинематической связи в паре волнообразователь—плунжер плунжерной передачи. Приведено численное решение для опытно-промышленного образца плунжерного газогидравлического двигателя.

Ключевые слова: плунжерная передача, гибкий элемент, прочностной расчет.

The strength analysis of a flexible element for the power closure of the kinematic coupling in a pair of waveform-plunger of a plunger gear is considered. A numerical solution for a pilot-industrial sample of a plunger gas-hydraulic engine is given.

Keywords: plunger gear, flexible element, strength analysis.

Одним из вариантов конструкции гибкого элемента (ГЭ) замыкания кинематической связи в плунжерной передаче является конструкция с гибкими металлическими тросами (рис. 1) [1], в которой функции ГЭ выполняет трос, замкнутый в кольцо с помощью втулки или сплетенный в виде кольца при изготовлении.

Такая конструкция отличается рядом преимуществ. Например, металлические тросы имеют значительно большее сопротивление усталости, чем гибкие зубчатые колеса, вследствие отсутствия концентраторов напряжений и, следовательно, больший ресурс. Для ГЭ данной конструкции характерны меньшие, чем для пружинных колец, потери мощности на вывод плунжеров из зацепления в свободной зоне. Кроме того, тросы такой конструкции менее трудоемки в изготовлении и более ремонтопригодны.

Эквивалентные напряжения, возникающие при работе в теле троса, можно определить и через следствия решения задачи Эйлера, если воспользоваться моделью троса в виде нерастяжимой гибкой нити.

Трос под действием приложенных к нему нагрузок со стороны генератора можно представить в виде нерастяжимой гибкой нити, охватывающей четыре парных направляющих блока (рис. 2) с радиусами r и R. При этом полученную в результате огибания блоков с углами охвата α_1 и α_2 траекторию деформирования троса можно в идеализированном виде описать уравнением эллипса с большой осью $a = R_{a2} + e_0$ и малой осью $b = R_{a2} - e_0$, где R_{a2} — радиус окружности вершин зубчатого колеса, e_0 — эксцентриситет передачи (деформация траектории).

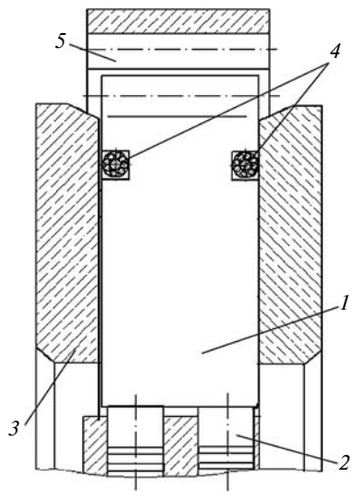


Рис. 1. Конструкция передачи с гибким элементом в виде тросов: *1* — плунжер; *2* — поршень волнообразователя; *3* — сепаратор; *4* — металлические тросы; *5* — зубчатое колесо

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 3)

12. **Ermakov A. I., Urlapkin A. V.** The influence of a blade Vibrations connectivity on a degree of disturbance of turbine wheels rotation symmetry // Research Journal of Applied Sciences. 2014. 9 (11). P. 800—805.

13. **Бояров К. В., Рязанов А. И., Чемпинский Л. А.** Разработка параметрической 3D модели рабочей лопатки компрессора // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. С. П. Королева. Самара: СГАУ, 2011. 3 (27). Ч. 3. С. 182—190.

14. **Shabliy L. S., Cherniaev A.** Optimization of gas turbine compressor blade parameters for gas-dynamic efficiency under strength constraint // 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. 2014. P. 523—528.

15. **Рязанов А. И., Горячкин Е. С.** Твердотельное параметрическое CAD моделирование в Siemens NX: Электрон. учеб. пособие. Самара: СГАУ. Электрон. текстовые и граф. дан. (5,67 Мбайт). 2014. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

16. **Ryazanov A. I.** Automated 3D modeling of working turbine blades // Russian Engineering Research. 2016. 36 (9). P. 751—754.

Ve618.fm Page 8 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

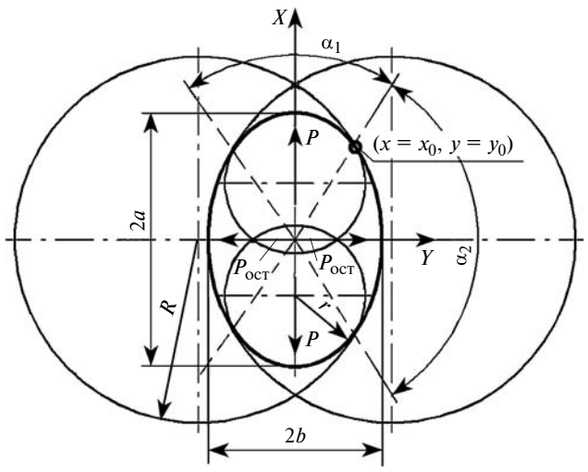


Рис. 2. Представление траектории деформирования троса ПГД в идеализированном виде

Радиусы условных огибаемых блоков при известном законе изменения кривизны траектории эллипса [2] находим по выражениям:

$$r(x_0 = a,\ y_0 = 0) = b^2/a = (R_{a2} - e_0)^2/(R_{a2} + e_0);$$

$$R(x_0 = 0,\ y_0 = b) = a^2/b = (R_{a2} + e_0)^2/(R_{a2} - e_0),$$

где x_0 и y_0 — координаты точки, в которой определяется радиус кривизны троса.

Углы охвата α_1 и α_2 определяются конструкцией золотника генератора, в данном случае можно принять $\alpha_1 = \beta_t$ и $\alpha_2 = \beta_{tp}$, где β_t и β_{tp} — углы растров золотника генератора соответственно высокого и низкого давления.

Согласно методу расчета гибких нитей [3] напряжения в любой точке троса определяются по зависимости

$$\sigma_\Sigma = \sigma_0 + \sigma_и,$$

где σ_0 — напряжения, вызванные растяжением троса под действием сил, приложенных со стороны генератора; $\sigma_и$ — напряжения, вызванные изгибом троса при охвате огибающих блоков.

Трос, деформированный при работе, можно условно разделить на четыре участка (рис. 3): 1 и 1′, 2 и 2′. На участках 1 и 1′ на трос действует сила P, вызванная рабочим давлением p, которое создается под поршнями волнообразователя, а на участках 2 и 2′ на трос действует сила $P_{ост}$, обусловленная наличием остаточного давления $p_{ост}$ под поршнями вследствие их неполного опорожнения при работе.

Напряжения изгиба на участках 2 и 2′ определяются выражением [4]:

$$\sigma_{и2} = \sigma_{и2'} = E/[0{,}5d_т/(R + 0{,}5d_т)],$$

а напряжения на участках 1 и 1′:

$$\sigma_{и1} = \sigma_{и1'} = E/[0{,}5d_т/(r + 0{,}5d_т)],$$

где E — приведенный модуль упругости троса (для тросов, изготовленных из стали 40Г, $E = 2170$ МПа, из стали 60Г $E = 2109$ МПа [5]), $d_т$ — наружный диаметр поперечного сечения троса.

Напряжения, вызванные растяжением троса под действием сил, определяем следующим образом.

При принятии абсолютной симметричности деформированного троса, согласно работе [3], растягивающие усилия в ветвях троса на участке 1—1′ при рассмотрении его отдельно от других участков (рис. 4) находятся в приближенном соотношении

$$P = (F_1 + F_2)\cos(90^\circ - \alpha_1/2) = (F_1 + F_2)\sin(\alpha_1/2), \quad (1)$$

при условии нерастяжимости троса.

При контрольных испытаниях плунжерного газогидравлического двигателя (ПГД) было отмечено, что трос перемещается в направляющих пазах, совершая вращательное движение. При этом направление вращения троса совпадает с направлением вращения золотника, что вызвано силами трения, возникающими между тросом и направля-

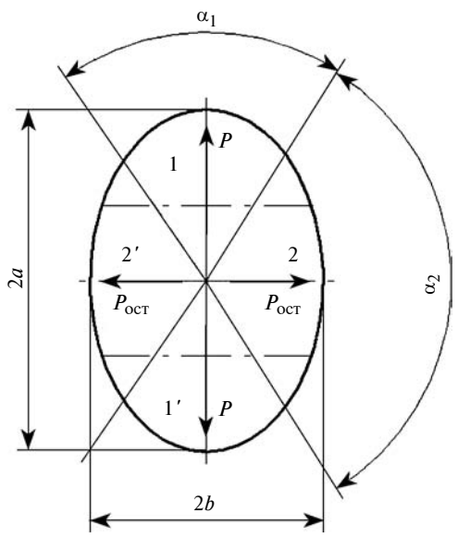


Рис. 3. Схема к определению напряжений в ветвях троса

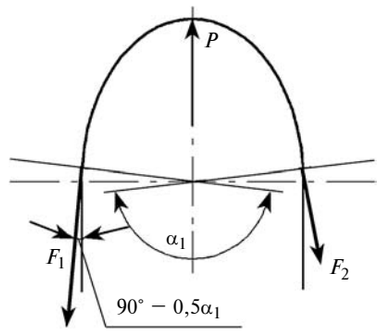


Рис. 4. Схема к определению связи между силами в ветвях троса при его деформировании

Ve618.fm Page 9 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

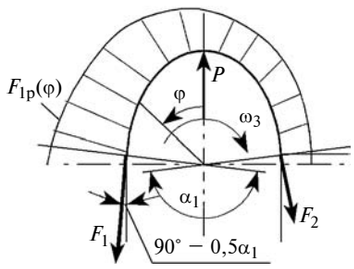


Рис. 5. Схема к определению максимального растягивающего усилия в тросе

ющими, которые и генерируют тангенциальные усилия, заставляющие трос перемещаться в указанном направлении [6].

Соотношение между силами в ветвях троса с учетом сил трения троса о направляющие плунжера при его перемещении можно получить из уравнения Эйлера. Так, при принятии числа плунжеров $Z_п = \infty$, имеем:

$$F_{1p}(\varphi) = F_2(\varphi) = F_1 e^{-f\varphi}, \qquad (2)$$

где $f = 0{,}15$ — коэффициент трения между тросом и направляющими плунжера (для случая отсутствия смазки); φ — угол, определяющий точку троса, в которой вычисляется растягивающая сила (рис. 5).

Из выражения (2) следует, что максимальное растягивающее усилие для рассматриваемого участка возникает в точке $\varphi = 0{,}5\alpha_1$, в которой $F_{1pmax}(\varphi) = F_2(0{,}5\alpha_1) = F_1 e^{0{,}5f\alpha_1}$. Исходя из этого, максимальная растягивающая сила с учетом формул (1) и (2), выраженная через P, определяется как

$$F_{1pmax} = P/[(1 + e^{-0{,}5f\alpha_1})\sin(0{,}5\alpha_1)],$$

где $P = (F_1 + F_1 e^{-0{,}5f\alpha_1})\sin(0{,}5\alpha_1)$.

Аналогично рассуждаем при отдельном рассмотрении участка 2. Для этого случая максимальная растягивающая сила, возникающая в месте сопряжения участков 1 и 2, составляет

$$F_{2pmax} = P_{ост}/[(1 + e^{-0{,}5f\alpha_2})\sin(0{,}5\alpha_2)].$$

Как уже было сказано, максимальные нормальные напряжения в теле троса возникнут в месте сопряжения рассмотренных участков; с учетом напряжений, вызванных изгибом троса, получим:

$$\sigma_\Sigma = (F_{1pmax} + F_{2pmax})/S_т + \sigma_{и1} =$$
$$= 4(F_{1pmax} + F_{2pmax})/\pi d_т^2 + 0{,}5d_т E/(r + 0{,}5d_т) =$$
$$= 4/\pi d_т^2\{P_{ост}/[(1 + e^{-0{,}5f\alpha_2})\sin(0{,}5\alpha_2)] +$$
$$+ P/[(1 + e^{-0{,}5f\alpha_1})\sin(0{,}5\alpha_1)]\} +$$
$$+ 0{,}5d_т E/(r + 0{,}5d_т). \qquad (3)$$

Считая для упрощения $\alpha_1 = \alpha_2$ (так как в реальных конструкциях соблюдается $\alpha_1 \approx \alpha_2$), учитывая выражение (3) и принимая во внимание, что $\alpha_1 = \beta_t$, получим выражение для определения максимальных напряжений в теле троса, действующих в месте сопряжения участков:

$$\sigma_\Sigma = \sigma_{0max} + \sigma_{иmax} =$$
$$= (P_{ост} + P)/[\pi d_т^2 t(1 + e^{-0{,}5f\beta_t})\sin(0{,}5\beta_t)] +$$
$$+ 0{,}5d_т E/[(R_{a2} - e_0)^2/(R_{a2} + e_0) + 0{,}5d_т],$$

где t — число одновременно устанавливаемых тросов.

Необходимый из условия статической прочности диаметр троса выбираем по выражению:

$$\sigma_\Sigma(d_т) \le \sigma_{0,2}/(n_т n_{доп}), \qquad (4)$$

где $n_{доп} = 1{,}3 \div 1{,}4$ — дополнительный коэффициент запаса, учитывающий наличие нормальных и касательных напряжений в проволоках троса (вследствие их свивки); $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести материала проволок.

Расчет, проведенный для тросов плунжерного газогидравлического двигателя ПГД-1 при параметрах: $p = 4{,}0$ МПа, $p_{ост} = 0{,}36$ МПа, число зон зацепления $z = 2$, $\beta_t = 1{,}4$ рад, $E = 2170$ МПа, $d_т = 3{,}0$ мм, $t = 2$, — дал следующие результаты: $\sigma_{0max} = 46{,}426$ МПа, $\sigma_{и\,max} = 33{,}182$ МПа, $\sigma_\Sigma = 79{,}609$ МПа. При использовании в тросе проволоки, изготовленной из стали 40Г методом холодного волочения с $\sigma_в = 1200$ МПа и $\sigma_{0,2} = 940$ МПа, подстановкой данных в условие (4) получаем:

$$\sigma_\Sigma(d_т) = 79{,}609 \le \sigma_{0,2}/(n_т n_{доп}) =$$
$$= 940/(1{,}5 \cdot 1{,}4) = 447{,}62 \text{ МПа}.$$

Согласно полученному результату при $d_т = 3{,}0$ мм условие статической прочности троса практически выполняется и фактический коэффициент запаса прочности составляет $n_т n_{доп} = 940/79{,}61 = 11{,}81$. В ПГД-1, учитывая номенклатуру изготовляемых тросов, приняли тросы диаметром $d_т = 3{,}5$ мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Каракулов М. Н.** Особенности конструкции и области эффективного использования плунжерных передач // Вестник машиностроения, 2008. № 10. С. 13—16.

2. **Воднев В. Т.** Математический словарь высшей школы. Минск: Высшая школа, 1984. 470 с.

3. **Иосилевич Г. Б.** Детали машин. М.: Машиностроение, 1988. 437 с.

4. **Ландау Л. Д., Лившиц Е. М.** Теория упругости. Т. VII. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1987. 300 с.

5. **Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.** Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Научная мысль, 1988. 327 с.

6. **Добролюбов А. И.** Механизмы на гибких и упругих элементах. Минск: Наука и техника, 1984. 180 с.

Ve618.fm Page 10 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.22

С. П. ЕРЕСКО, Т. Т. ЕРЕСКО, доктора технических наук, Е. В. КУКУШКИН,
В. А. МЕНОВЩИКОВ, д-р техн. наук (Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск), e-mail: ironjeck@mail.ru

Влияние вибрационных нагрузок на перекос тел качения в игольчатом подшипнике карданного шарнира

Исследовано влияние вибраций на условия работы карданных шарниров. Получено выражение, описывающее колебания угла перекоса иглы подшипника при действии переменного момента от сил трения.

Показано, что в динамике, как и в статике, угол перекоса игл зависит от конструктивных размеров карданного шарнира на игольчатых подшипниках и нагрузки, приходящейся на одну иглу в рабочей зоне подшипника.

Ключевые слова: вибрационная нагрузка, карданный шарнир, перекос игл, перекос тел качения.

The influence of vibrations on the operating conditions of cardan joints is studied. The expression is obtained, that describes the oscillations of the misalignment angle of a bearing needle under the action of the variable torque from the frictional forces. It is shown, that in dynamics, as well as in statics, the angle of needle misalignment depends on the design dimensions of the cardan joint on needle bearings and the load per a needle in the working area of the bearing.

Keywords: vibration load, cardan joint, misalignment of needles, skew of rolling elements.

Карданные шарниры широко применяются во многих механизмах, используемых в строительстве, сельском хозяйстве, автомобильной промышленности и других отраслях. Карданные шарниры служат для передачи крутящего момента при несовпадении осей валов и изменении их взаимного положения. Валы, соединенные карданными шарнирами, называются карданными. Механизм, содержащий один или несколько карданных валов, передающих крутящие моменты между агрегатами, оси которых не совпадают и могут изменять свое положение, называется карданной передачей. Для компенсации изменения расстояний между агрегатами трансмиссии и карданной передачей используют подвижные в осевом направлении шлицевые муфты. Большинство отказов узлов, установленных на подвижных объектах, вызывается воздействием интенсивных механических вибраций. Кроме того, вопросы прочности и надежности при действии вибраций имеют решающее значение при разработке и конструировании машин. В настоящее время проведено много исследований в этом направлении, однако влияние вибрации на карданные шарниры изучено недостаточно. Чтобы достоверно говорить о влиянии вибрации, необходимо рассмотреть все возможные варианты, поэтому остановимся на карданных шарнирах в карданной передаче.

Под вибрацией понимают механические, часто синусоидальные, колебания системы с упругими связями, возникающие в машинах и аппаратах при периодическом смещении центра тяжести какого-либо тела от положения равновесия или изменении формы тела по сравнению с его состоянием в статике. Такое колебательное движение происходит, как правило, в результате действия неуравновешенных сил: дисбаланса вращающихся частей, инерционного возбуждения при работе возвратно-поступательных механизмов, ударных процессов и др.

Для карданных валов характерны такие повреждения, как скручивание, изгиб вала, погнутость щек вилки, выкрошивание поверхностных слоев материала, усталость материала. Скручивание на угол более 3°, также как и наличие значительных вмятин, требует замены вала. Одной из причин появления вибрации может быть некачественный ремонт карданного вала. При разборке/сборке вала с применением молотка деформируются посадочные места стаканов крестовин, не устраняются люфты в сочленениях, нарушается первоначальное взаимное положение валов при сборке.

Практика показывает, что дефекты карданной передачи появляются в основном при нарушении правил эксплуатации техники. Например, преждевременный выход крестовин из строя чаще всего связан с повышенными контактными напряжениями. На поверхности шипов крестовин в первую очередь остаются следы от игольчатых подшипников, работающих с повышенной нагрузкой. Это так называемое бринеллирование, которое значительно ускоряет общий износ крестовины и ее выход из строя. Повышенные нагрузки отрицательно влияют и на шлицевые соединения, создавая их дополнительный изгиб [1—3].

В связи с различием процессов разрушения игольчатых подшипников при низких и высоких максимальных напряжениях цикла различают малоцикловую и многоцикловую усталости: малоцикловая усталость, когда усталостное повреждение или разрушение материала происходит при упругопластическом деформировании; многоцикловая усталость, когда усталостное повреждение или раз-

Ve618.fm Page 11 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

рушение материала происходит в основном при упругом деформировании.

Вибрация в свою очередь создает дополнительную нагрузку на ось вала, что влияет на малоцикловую усталость игольчатого подшипника. Поверхностное выкрошивание шипов крестовин возникает вследствие малоцикловой усталости материала [4]. В связи с развитием техники, энергетики и инженерных конструкций в разных отраслях производства проблема малоцикловой прочности их элементов стала актуальной в 1950-е годы [5].

Для снижения вибрации в процессе изготовления валы балансируют на испытательных стендах. Балансировка проводится в заводских условиях на специальных автоматизированных балансировочных станках. На концы трубы карданного вала как можно ближе к самой опоре точечной сваркой приваривают пластины определенной массы и в определенных местах, исходя из требуемой балансировки. Так как пульсацию крутящего момента в трансмиссии устранить довольно сложно, постоянно ищут пути снижения крутильных колебаний [6].

Использование конструкционных материалов меньшей плотности существенно упрощает проблему повышения критической частоты вращения карданной передачи [7]. Сегодня и в России, и за рубежом ведутся перспективные разработки использования неметаллических композиционных материалов с полимерной матрицей и стеклянными, углеродными и другими волокнами в качестве материала карданных валов. Есть положительные результаты, но пока стоимость композитных карданов очень высока [8].

Современные методы измерения вибрации основаны на преобразовании колебательных процессов в электрический сигнал, который усиливается и обрабатывается. Основными преобразователями являются интегральные датчики — акселерометры. Это датчики линейного ускорения, которые используются для измерения углов наклона тел, сил инерции, ударных нагрузок и вибраций, широко применяются на транспорте, в медицине, в промышленных системах измерения и управления, инерциальных системах навигации. Промышленность изготовляет много разновидностей акселерометров, имеющих различные принципы действия, диапазоны измерения ускорений, массу, габаритные размеры и стоимость [9].

Вибрационные колебания могут оказывать на работоспособность деталей и узлов машин как положительное, так и отрицательное влияние. Практика эксплуатации деталей и узлов машин показывает, что вибрационные колебания при определенных нагрузках и времени воздействия дают положительный эффект — это вибрационная накатка или наклеп поверхностей. Изучение такого эффекта представляет определенный интерес для повышения несущей способности контактных поверхностей и может дать ответ на ряд таких вопросов, как повышение плотности структуры материала при действии вибраций и без них, влияние колебаний на состояние поверхностных контактных слоев, влияние вибраций на условия трения в контакте. Все это имеет значение при работе карданных шарниров.

Таким образом, для увеличения срока эксплуатации карданных передач и повышения их качества необходимо снижать вибрацию, а для этого следует изучать ее влияние на условия работы карданных шарниров.

Карданные шарниры тяговых и транспортных машин работают при разных режимах нагружения, в частности, при динамических, когда на узел действуют вибрации различной частоты, как правило, в диапазоне от 20 до 300 Гц [10]. Влияние вибрации на поведение игл в игольчатых подшипниках ранее аналитически не исследовали. Экспериментально это было установлено в работе [11], а в работе [12] отмечалось положительное влияние вибрации на изнашивание поверхностей пар трения — повышение их долговечности. Поэтому изучение данного вопроса актуально и представляет интерес.

При наличии излома соединяемых шарниром валов цапфа в рабочей зоне подшипника колеблется на угол $\alpha_и$ [13]. На колебательно-вращательное движение шарнира в результате неравномерного вращения карданного вала с удвоенной частотой и резонансных колебаний от таких источников возбуждения, как двигатель, главная передача, коробка передач, ведущее колесо движителя, накладывается переменный момент, создающий вибрации элементов шарнира, в частности игл. Под действием этого момента момент от сил трения, вызывающий перекос игл, постоянно изменяет знак [7, 14, 15], но так как на иглу, контактирующую с шипом, действует переменный момент от сил трения, то она также совершает угловое колебание относительно оси шипа крестовины. Этому способствует также и некоторая свобода движения (в пределах зазоров) как в радиальном, так и в осевом направлении. Расчетная схема колебаний иглы приведена на рис. 1.

Для упрощения массу иглы сосредоточим в точках действия сил по обе стороны от центра иглы (см. рис. 1). Сопротивления, возникающие при колебаниях иглы на угол ψ, считаем пропорциональными угловой скорости [7, 16]. В этом случае уравнение движения иглы имеет вид:

$$J_и\psi_1'' + \xi\psi_1' + K\psi_1 = M_{ср} + M_п\sin\omega_в t, \qquad (1)$$

где $J_и$ — момент инерции иглы; ψ — угол перекоса иглы; ξ — коэффициент демпфирования; K — коэффициент сопротивления; $M_{ср}$ — средний посто-

Ve618.fm Page 12 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

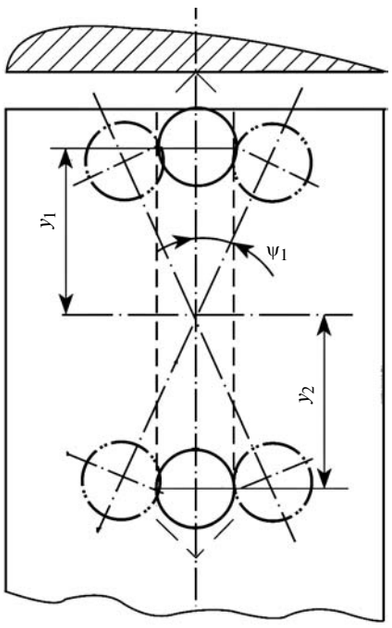


Рис. 1. Расчетная схема для определения влияния вибрации на перекос тел качения

янный момент нагружения карданного шарнира; $M_п$ — переменный момент нагружения; $\omega_в$ — частота вынуждающей силы; t — время.

Собственные колебания иглы, возникающие от трения в контакте, не учитываются, так как по сравнению с вынужденными колебаниями они ничтожно малы [3]. Для решения уравнения (1) введем обозначения:

$$2n = \xi/J_и; \quad k^2 = K/J_и; \quad a = M_{ср}/J_и;$$

$$b = M_п/J_и; \quad p = \omega_в$$

и, приняв $\psi_1 = x$, получим уравнение

$$x'' + 2nx' + k^2x = a + b\sin pt, \qquad (2)$$

где $x' = dx/dt = d\psi/dt$.

Решение уравнения (2) находим в виде $x = x_1 + x_2$. Общее решение x_1 однородного дифференциального уравнения рассмотрим для трех условий:

1) при $n < k$ получим

$$x_1 = e^{-nt}(C_1\cos k_1 t + C_2\sin k_1 t),$$

где $k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}$;

2) при $n = k$ получим

$$x_1 = e^{-nt}(C_1 + tC_2);$$

3) при $n > k$ получим

$$x_1 = C_1e^{(-n+d)t} + C_2e^{(-n-d)t}, \text{ где } d = \sqrt{n^2 - k^2}.$$

Решение x_2 неоднородного уравнения находим в виде:

$$x_2 = A + B\sin pt + C\cos pt, \qquad (3)$$

где A, B, C — постоянные, для определения которых используем производные x_2' и x_2'':

$$x_2' = Bp\cos pt - Cp\sin pt;$$

$$x_2'' = -Bp^2\sin pt - Cp^2\cos pt.$$

Подставив эти значения в уравнение (3), получим уравнение

$$-Bp^2\sin pt - Cp^2\cos pt + 2nBp\cos pt - 2npC\sin pt + k^2A + k^2B\sin pt + k^2C\cos pt = a + b\sin pt. \qquad (4)$$

Для определения постоянных A, B и C приравняем коэффициенты при $\sin pt$, $\cos pt$ и свободные члены уравнения (4):

$$\left.\begin{aligned} -Bp^2 - 2npC + k^2B &= b;\\ -C(p^2 - k^2) + 2npB &= 0;\\ k^2A &= a. \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Из первого уравнения системы (5) определим B и, подставив это значение в это же уравнение, получим уравнение

$$-p\frac{p^2 - k^2}{2n}C - 2npC + k^2\frac{p^2 - k^2}{2np}C = b,$$

решив которое, определим

$$C = -\frac{-2pnb}{(p^2 - k^2) + 4n^2p^2}.$$

Найденные значения A, B и C подставим в уравнение (3) и получим решение неоднородного дифференциального уравнения в виде:

$$x_2 = \frac{a}{k^2} - \frac{b}{(p^2 - k^2)^2 + 4n^2p^2}(\sin pt + 2np\cos pt).$$

Используем начальные условия $x_1(0) = 0$ и $x_1'(0) = 0$ при $t = 0$ для определения коэффициентов C_1 и C_2 из общего однородного уравнения.

1. При $n < k$ получим:

$$x = e^{-nt}(C_1\cos k_1 t + C_2\sin k_1 t) + \frac{a}{k^2} - \frac{b}{(p^2 - k^2)^2 + 4n^2p^2}(\sin pt + 2np\cos pt);$$

$$x' = -ne^{-nt}(C_1\cos k_1 t + C_2\sin k_1 t) +$$
$$+ e^{-nt}k_1(-C_1\sin k_1 t + C_2\cos k_1 t) -$$
$$- \frac{bp}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}(\cos pt + 2np\sin pt).$$

Откуда найдем:

$$C_1 = -\frac{a}{k^2} + \frac{2npb}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2};$$

$$C_2 = \frac{nC_1 + \dfrac{pb}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}}{\sqrt{k^2-n^2}}.$$

2. При $n = k$ получим:

$$x = e^{-nt}(C_1 + tC_2) +$$
$$+ \frac{a}{k^2} - \frac{b}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}(\cos pt - 2np\,\mathrm{sni}\,pt);$$

$$x' = -ne^{-nt}(C_1 + tC_2) + e^{-nt}C_1 -$$
$$- \frac{b}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}(\sin pt + 2np\cos pt).$$

Откуда найдем:

$$C_1 = \frac{b + 2npb}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2} - \frac{a}{k^2};$$

$$C_2 = \frac{nb^2(1+2np)}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2} - \frac{na}{k^2}.$$

3. При $n > k$ получим:

$$x = C_1e^{(-n+d)t} + C_2e^{(-n-d)t} +$$
$$+ \frac{a}{k^2} - \frac{b}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}(\sin pt + 2np\cos pt); \quad (6)$$

$$x' = (-n+d)C_1e^{(-n+d)t} + (-n+d)C_2e^{(-n-d)t} +$$
$$+ \frac{a}{k^2} - \frac{bp}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}(\cos pt + 2np\sin pt).$$

Откуда найдем:

$$C_1 = \frac{pb}{\left[(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2\right]\left(-n + \sqrt{n^2-k^2}\right)};$$

$$C_2 = 0.$$

Определив коэффициенты C_1 и C_2, после преобразований получим окончательное решение уравнения (6).

1. При $n < k$ получим:

$$x = -\frac{ae^{-nt}}{k^2}\left(\cos k_1 t - \frac{n}{\sqrt{k^2-n^2}}\sin k_1 t\right) +$$
$$+ \frac{pbe^{-nt}}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}\left(2n\cos k_1 t + \frac{2n^2+1}{\sqrt{k^2-n^2}}\sin k_1 t\right) -$$
$$- \frac{b}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}(\sin pt + 2np\cos pt) + \frac{a}{k^2}.$$

2. При $n = k$ получим:

$$x = \frac{b}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2}[(1+2np)(1+nbt)e^{-nt} -$$
$$- \sin pt - 2n\cos pt] + \frac{a}{k^2}[1 - e^{-nt}(1+nt)].$$

3. При $n > k$ получим:

$$x = \frac{b}{(p^2-k^2)^2 + 4n^2p^2} \times$$
$$\times \left(\frac{pe^{(-n+d)}}{-n + \sqrt{n^2-k^2}} - \sin pt + 2n\cos pt\right) + \frac{a}{k^2}.$$

Подставив исходные данные (обозначения принятые в начале решения), определим угол ψ_1 колебания иглы:

$$\psi_1 = \frac{M_{t\text{ср}}}{K_L} + \frac{2\pi f\xi M_{tx}}{(4\pi^2f^2J_{\text{и}} - K_L)^2 + 4\pi^2f^2\xi^2}. \quad (7)$$

Неоднородное уравнение (3) можно представить в форме, предложенной в работе [16], что позволит определить коэффициент демпфирования:

$$\psi_1 = \Phi_1\sin(\omega_{\text{в}}t - \varepsilon), \quad (8)$$

где Φ_1 — амплитуда колебаний системы; ε — фазовый сдвиг амплитуды колебаний.

Здесь

$$\Phi_1 = \frac{1}{\xi^2\omega_{\text{в}}^2 + (K - J_{\text{и}}\omega_{\text{в}}^2)^2} \times$$
$$\times \sqrt{\left[M_{\text{ср}}^2 + (M_{\text{ср}} + M_{\text{п}})^2\right]\left[\xi^2\omega_{\text{в}}^2 + (K - J_{\text{и}}\omega_{\text{в}}^2)^2\right]}; \quad (9)$$

$$\varepsilon = \operatorname{arctg}\frac{M_{\text{ср}}(K - J_{\text{и}}\omega_{\text{в}}^2) - \xi\omega_{\text{в}}(M_{\text{ср}} + M_{\text{п}})}{\omega_{\text{в}}\xi M_{\text{ср}} + (K - J_{\text{и}}\omega_{\text{в}}^2)(M_{\text{ср}} + M_{\text{п}})}. \quad (10)$$

Подставим решение (9) в уравнение (8) и определим коэффициент демпфирования при условии $\varepsilon = \pi$ [17]:

$$\psi_1 = \Phi_1\sin(\pi - \omega_{\text{в}}t) = -\Phi_1\sin\omega_{\text{в}}t. \quad (11)$$

Ve618.fm Page 14 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

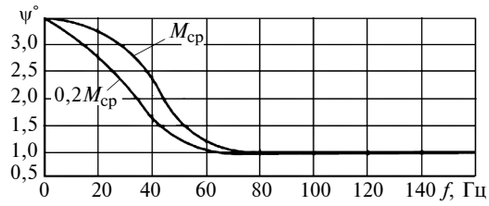


Рис. 2. Зависимости угла ψ перекоса иглы от частоты *f* вибрационных колебаний

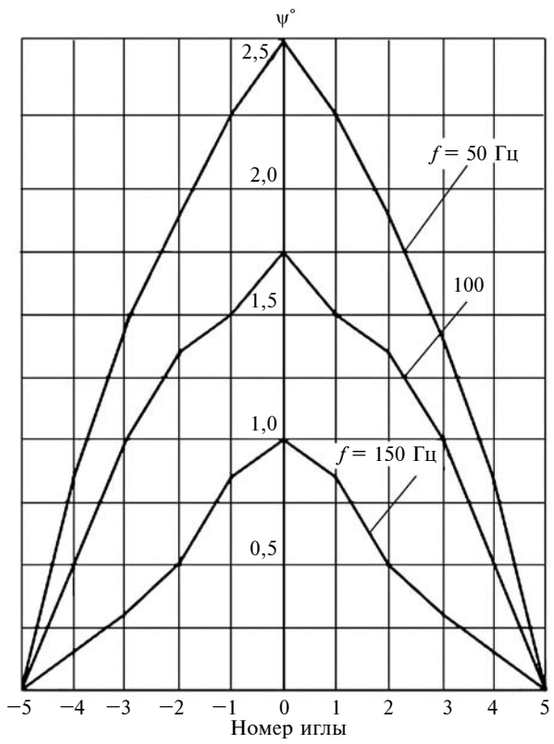


Рис. 3. Зависимости угла ψ перекоса тел качения от частоты *f* вибрационных колебаний для граничных значений переменного момента в принятом интервале [формула (16)]

Зависимость (11) подставим в уравнение (1) и получим:

$$J_и\Phi_1\omega_в^2\sin\omega_в t - \xi\Phi_1\omega_в\cos\omega_в t - K\Phi_1\sin\omega_в t = \\ = M_п\sin\omega_в t.$$

Так как данное уравнение удовлетворяет любому t, то получим:

$$\begin{cases} J_и\Phi_1\omega_в^2 - K\Phi_1 = M_п; \\ -\xi\Phi_1\omega_в = M_{ср}, \end{cases}$$

откуда определим амплитуду колебаний

$$\Phi_1 = \frac{M_п}{J_и\omega_в^2 - K} \qquad (12)$$

и коэффициент демпфирования

$$\xi = -\frac{M_{ср}}{\Phi_1\omega_в}. \qquad (13)$$

Зависимость, аналогичная зависимости (13), была получена Р. П. Доброгаевым [17] применительно к двигателям. Выразим коэффициент демпфирования через амплитуду (12) и получим:

$$\xi = \frac{M_{ср}(J_и\omega_в^2 - K)}{\omega_в(M_{ср} + M_п)}. \qquad (14)$$

Колебание угла перекоса иглы при действии переменного момента M_{max} от сил трения определим по формуле

$$\psi_{1max} = \frac{M_{ср} + M_п}{J_и\pi^2 f^2 - K}. \qquad (15)$$

Приняв величину переменного момента от сил $M_{ср}$ в шарнире порядка 20÷100 % среднего момента, определим интервал:

$$0{,}2M_{ср} \le M_п \le M_{ср}. \qquad (16)$$

Исследования позволили получить зависимости угла ψ перекоса иглы для граничных значений переменного момента в принятом интервале (16) (рис. 2). С увеличением частоты вибрационных колебаний перекос игл уменьшается. При расчете углов ψ перекоса игл в подшипнике от вибрационных колебаний можно принять переменный момент от сил трения $M_{max} = 0{,}6M_{ср}$.

Угол ψ_{1max}, рассчитанный по формуле (15) при моменте $0{,}6M_{ср}$, отличается на 15÷20 % от угла, рассчитанного при моментах $0{,}2M_{ср}$ и $M_{ср}$. Следовательно, для расчетов можно взять среднее значение переменного момента $0{,}6M_{ср}$. Расчет выполнен для карданного шарнира трактора тягового класса 14 кН. Получены зависимости (рис. 3), характеризующие перекос игл в нагруженной зоне при переменном моменте $0{,}6M_{ср}$ и частоте вибрационных колебаний 20, 50 и 150 Гц.

Исследования показали, что угол перекоса игл в динамике, как и в статике, зависит от конструктивных размеров и нагрузки, приходящейся на одну иглу в рабочей зоне подшипника, а перекос игл существенно влияет на развитие остаточных деформаций, что снижает долговечность шарнирного узла в целом [3].

Учет при проектировании карданных передач полученных аналитических выражений для определения остаточных деформаций в рабочей зоне игольчатого подшипника позволит существенно уточнить расчеты гарантированного ресурса карданных передач при нагрузочных режимах, эквивалентных рассмотренным в работе.

Ve618.fm Page 15 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.838.222.003.13

М. П. ШИШКАРЕВ, д-р техн. наук, заслуженный изобретатель РФ (Донской ГТУ, г. Ростов-на-Дону), e-mail: shishkarevm@mail.ru

Экономические аспекты применения предохранительных фрикционных муфт

Изложены условия экономически целесообразного применения предохранительных муфт с повышенной точностью срабатывания в приводах машин.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, экономический эффект, стоимость работ, плотность распределения.

The conditions of economically expedient application of safety couplings with increased accuracy of operation in machine drives are stated.

Keywords: adaptive friction clutch, economic effect, cost of works, distribution density.

Состояние вопроса и постановка задачи исследования

В работе [1] определены функции адаптивных фрикционных муфт (АФМ) [2]. Показано, что кроме ограничения перегрузок, наступающих в приводе машины, и предотвращения поломок деталей и узлов привода, АФМ являются средством уменьшения размеров и массы деталей привода в результате снижения в них механических напряжений.

Очевидно, что второе свойство АФМ позволяет также снизить стоимость деталей, привода и машины в целом [3].

Указанная возможность получить экономический эффект от применения АФМ не является единственной. Если уровень защиты привода машины недостаточен, в результате наступления перегрузки механические напряжения могут достичь значений, превышающих допустимые [4], что приведет к поломке наиболее слабого звена привода, т. е. к выходу машины из строя. Исключение расходов, связанных с простоем машины и восстановлением ее работоспособности после отказа, и составляет вторую часть экономического эффекта от использования АФМ.

Определим экономический эффект от использования АФМ сравнением ее с предохранительной фрикционной муфтой, имеющей обычную точность срабатывания [5]. Замена в приводе машины предохранительной фрикционной муфты на АФМ приводит к уменьшению не только массы, размеров и энергоемкости привода, но и числа выходов из строя деталей привода вследствие поломок, про-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 10)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Малаховский Я. Э., Лапин А. А., Веденеев Н. К.** Карданные передачи. М.: Машгиз, 1962. 158 с.

2. **Лысов М. И.** Карданные механизмы. Конструкция, теория, расчет и испытания. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1945. 158 с.

3. **Меновщиков В. А., Ереско С. П.** Исследование и совершенствование игольчатых подшипников карданных передач транспортно-технологических машин. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2006. 283 с.

4. **Андриенко Л. А.** Прогнозирование ресурса подшипников качения по критерию изнашивания // Справочник. Инженерный журнал. 2001. № 9. С. 22—25.

5. **Афанасьев Н. И.** Микроструктурная картина возникновения трещины усталости // Журнал технической физики. 1944. Т. 14. С. 10, 11.

6. **Блох Л. С.** Основные графические методы обработки опытных данных. М.—Л.: Машгиз, 1951. 164 с.

7. **Балыбердин В. С., Бахарев В. П.** О значении физических концепций в исследовании кинетики усталостной повреждаемости материалов / Деп. в ВИНИТИ № 3967-В88. М., 1988. 7 с.

8. **Бейзельман Р. Д., Цыпкин Б. В., Перель Л. Я.** Подшипники качения: Справочник. М.: Машиностроение, 1967. 572 с.

9. **Бейзельман Р. Д., Цыпкин Б. В., Перель Л. Я.** Подшипники качения: Справочник. М.: Машиностроение, 1975. 572 с.

10. **Цитович И. С.** Исследование кинематики и динамики карданных передач: Дис. ... канд. техн. наук: М., 1948. 147 с.

11. **Меновщиков В. А., Харазия Л. В.** Перекос игл в паре трения карданного шарнира на безсепараторном игольчатом подшипнике / Деп. в НИИмаш 13.01.75. ВИНИТИ. РЖ № 84. 1975. Реф. 5.48.381.

12. **Ишлинский А. Ю.** О проскальзывании в области контакта при трении качения // Известия АН СССР, отделение техн. наук. 1956. № 6. С. 3—15.

13. **Трощенко В. Т.** Деформация и разрушение металлов при многоцикловой нагрузке. Киев: Наука, 1981. С. 15—23.

14. **Пронин Б. А., Ревков Г. А.** Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (Вариаторы). М.: Машиностроение, 1967. 404 с.

15. **Галин Л. А.** Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука: Главная ред. физ.-мат. литературы, 1980. 304 с.

16. **Нейман П.** Усталость. ВИНИТИ № 1Д664, 1988. Пер. ст.: **Neuman P.** Max-Planck-Institut für Eisenforschung. GmbH Dusseldorf. BRD, 1988. V. 3. P. 392—434.

17. **Вихерт М. М., Доброгаев Р. П., Ляхов М. И.** Конструкция и расчет автотракторных двигателей. М.: Машиностроение, 1964. 552 с.

Ve618.fm Page 16 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

стоев машины, связанных с устранением последствий аварий, и к повышению производительности машины.

Результаты исследования предполагается использовать при расчетах и проектировании приводов машин, выборе типа предохранительной муфты и ее эксплуатационных характеристик для повышения технико-экономических показателей машин в результате улучшения их работоспособности и долговечности.

Кроме того, предполагается, что разработанная методика определения годового экономического эффекта от применения АФМ первого поколения в приводах машин может послужить основой для исследования экономической эффективности при использовании в машинах АФМ других типов, имеющих более высокие показатели точности срабатывания.

Задача исследования — определение экономического эффекта от использования АФМ в качестве органа защиты привода от перегрузок.

Решение задачи исследования

Случайное событие, заключающееся в срабатывании предохранительной муфты, может наступить только в том случае, когда возникает перегрузка в приводе машины. Абстрагируясь от причин и характера возникающей перегрузки, в качестве последней будем считать увеличение вращающего момента на ведомом валу АФМ, т. е. на валу, расположенном со стороны рабочего органа машины.

Срабатывание АФМ от возникающей перегрузки при настроечном значении коэффициента трения между фрикционными парами [6] не приводит к разрушению деталей, защищаемых муфтой, если перегрузка не систематическая, повторяющаяся с большой частотой. В последнем случае разрушение может произойти при нормальных значениях механических напряжений в деталях вследствие усталости материала [4].

Далее будем рассматривать разрушения деталей привода, наступающие в результате действия единичных перегрузок. Очевидно, что подобные перегрузки могут возникнуть только вследствие срабатывания АФМ при повышенном вращающем моменте, вызванном случайным увеличением коэффициента трения.

Случайное событие, заключающееся в разрушении наиболее слабого звена привода машины, может наступить только в результате появления двух последовательных случайных событий:

повышения коэффициента трения между фрикционными парами АФМ, которое должно быть таким, чтобы действие предельного вращающего момента при срабатывании муфты вызывало возникновение в наиболее слабом звене привода механических напряжений, превышающих допускаемые значения;

возникновения перегрузки на ведомом валу АФМ, величина которой равна или больше предельного момента сил трения фрикционной группы муфты, соответствующего новому значению коэффициента трения.

Если q_1 — вероятность появления первого из упомянутых событий, а q_2 — вероятность появления второго события, то согласно данным работы [7] вероятность наступления события, заключающегося в разрушении наиболее слабого звена привода машины, равна произведению вероятностей q_1 и q_2, т. е.

$$q = q_1 q_2. \tag{1}$$

Определение вероятности q является весьма важной и одновременно трудной задачей, поскольку решение ее в общем виде невозможно. Действительно, значения вероятностей q_1 и q_2 зависят от большого числа случайных факторов, каждый из которых в свою очередь зависит от конкретных условий эксплуатации привода машины, которые могут изменяться [8]. Поэтому решение задачи исследования в настоящей статье ограничено рамками частного примера. Естественно, что частное решение задачи может быть применено к решению в общем виде в части подхода и методики решения.

Выход из строя машины вследствие поломки наиболее слабого звена приводит к ее остановке. В результате машина перестает производить полезную работу или прекращает выпускать продукцию. Следовательно, в результате при выходе машины из строя экономические потери состоят из потерь видов:

потери вследствие снижения общей производительности вышедшей из строя машины за определенный промежуток времени, включающий период простоя машины, связанный с восстановлением ее работоспособности;

совокупные затраты на восстановление работоспособности машины.

Потери первого вида определяются формулой:

$$Q_1 = t_{\text{п}} Q_{\text{ч}}, \tag{2}$$

где Q_1 — экономические убытки, связанные с простоем машины, р.; $t_{\text{п}}$ — время простоя машины, ч; $Q_{\text{ч}}$ — стоимость 1 ч простоя машины, р./ч.

Стоимость 1 ч простоя машины составляет:

$$Q_{\text{ч}} = Q'_{\text{ч}} - Q_{\text{э}} - Q_{\text{об}} - Q_{\text{м}}, \tag{3}$$

где $Q'_{\text{ч}}$ — стоимость 1 ч работы машины, р.; $Q_{\text{э}}$ — стоимость энергоносителя, израсходованного за 1 ч работы машины, р.; $Q_{\text{об}}$ — стоимость затрат на обслуживание машины в течение 1 ч ее работы, р.; $Q_{\text{м}}$ — стоимость вспомогательных материалов, затрачиваемых в течение 1 ч работы машины, р.

Ve618.fm Page 17 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Структура формулы (3) объясняется тем, что во время простоя машины из-за ремонта техническое обслуживание ее не проводится, а энергоносители и расходные материалы не расходуются.

Стоимость 1 ч работы машины зависит от того, какой вид работы выполняет машина — выпуск готовых изделий или действия над технологической средой (например, тестомесильные установки, мукомольное оборудование, бетономешалки, землеройные машины и т. п.). Кроме того, на стоимость 1 ч работы машины влияет вид выпускаемой продукции и ее стоимость.

В тех случаях, когда речь идет о машинах, выпускающих готовую продукцию, критерием стоимостной оценки простоя машины должна служить стоимость изделий, выпускаемых в течение 1 ч работы.

Стоимость 1 ч работы технологического оборудования, по различным оценкам, составляет 2250÷4950 р.

Как правило, в результате поломки детали она не подлежит восстановлению и должна быть заменена новой деталью. В этом случае объем потерь второго вида определяется по одной из следующих формул:

$$Q_2 = C_д + C_р \quad (4)$$

или

$$Q_2 = C_м + C_и + C_р. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) приняты обозначения: $C_д$ — стоимость новой готовой детали, если она поставляется с машиной как запасная часть заводом-изготовителем или как запасная часть, приобретаемая отдельно; $C_р$ — стоимость работ по монтажу и демонтажу детали, наладке и регулировке узла привода; $C_м$ — стоимость материала заготовки детали за вычетом стоимости реализованных отходов; $C_и$ — стоимость работ по изготовлению детали взамен вышедшей из строя.

Таким образом, общие убытки от поломки детали составляют

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (6)$$

В формуле (6) составляющие Q_1 и Q_2 определяются соответственно по формулам (2) и (4).

Анализ показал, что вероятность q_1 (см. формулу (1)) больше поддается аналитическому расчету, чем вероятность q_2. Действительно, как указано выше, текущее, в том числе предельное (максимальное), значение коэффициента трения зависит от большого числа случайных факторов, равным образом влияющих на конечный результат [8]. Следовательно, согласно центральной предельной теореме Ляпунова, текущие значения коэффициента трения подчиняются нормальному закону распределения случайных величин [8].

Экспериментальными исследованиями, проведенными М. К. Афанасьевым [9], установлено, что для пары трения "сталь — феродо" (транскрипция М. К. Афанасьева) диапазон изменения коэффициента трения составляет 0,1÷1,0 при среднем его значении 0,35. Данный результат показывает, что симметричность нормального распределения соблюдается только по отношениям $f_{ср}/f_{min}$ и $f_{max}/f_{ср}$, где f_{min}, $f_{ср}$, f_{max} — соответственно минимальное, среднее и максимальное значения коэффициента трения.

Если принять в качестве моды значение $f_{ср}$, то, исходя из значений разностей $f_{ср} - f_{min}$ и $f_{max} - f_{ср}$, можно заключить, что распределение имеет положительную асимметрию.

Для определения вероятности того, что коэффициент трения примет максимальное значение f_{max}, используем следующее выражение [10]:

$$F(x, x + \Delta x) \approx f(x)\Delta x, \quad (7)$$

где $f(x)$ — плотность распределения случайной величины; Δx — ширина интервала значений случайной величины, в который с определенной вероятностью попадает интересующая нас случайная величина; $F(x, x + \Delta x)$ — функция распределения непрерывной случайной величины в указанном интервале.

По условию задачи случайной величиной является коэффициент трения, ширину интервала Δx примем равной 0,1, поскольку считаем, что при максимальном значении коэффициента трения $f_{max} = 1{,}0$ разрушение наиболее слабого звена привода машины может произойти, если коэффициент трения достигнет 0,9. Следовательно, $x = 0{,}9$, а интервал значений коэффициента трения, вероятность попадания в который определяется, составляет 0,9÷1,0.

Плотность распределения случайной величины x для закона нормального распределения определяется по формуле [10]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-a)^2/(2\sigma^2)}, \quad (8)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение нормального распределения; a — математическое ожидание случайной величины; e — основание натурального логарифма.

Используя правило "трех сигм" [10], запишем:

$$P|x - a| < 3\sigma = 2\Phi(\delta/\sigma), \quad (9)$$

где $P|x - a|$ — вероятность того, что отклонение случайной величины по абсолютному значению будет меньше утроенного среднего квадратического отклонения; Ф — табулированная функция Лапласа; δ — абсолютное отклонение случайной величины.

Ve618.fm Page 18 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Учитывая, что по правилу "трех сигм" $2\Phi(\delta/\sigma) = 0{,}9973$ [10], найдем: $\Phi(\delta/\sigma) = 0{,}49865$. Так как по условию задачи $\delta = f_{max} - f_{ср}$, то при $f_{max} = 1{,}0$ и $f_{ср} = 0{,}35$ имеем $\delta = 0{,}65$. В соответствии с формулой (9) по таблице значений функции Лапласа аргумент $x' = 3$, а $\sigma = 0{,}22$.

После подстановки найденного значения σ в формулу (8), а также учитывая, что $a = f_{ср}$, $x = f_{max}$, найдем плотность распределения случайной величины: $f(x) = 0{,}02$.

В соответствии с найденным значением плотности распределения случайной величины и на основе формулы (7) найдем вероятность того, что коэффициент трения принимает значение, принадлежащее интервалу Δx:

$$F(x, x + \Delta x) \approx f(x)\Delta x = 0{,}02 \times 0{,}1 = 0{,}002.$$

Таким образом, вероятность того, что значение коэффициента трения попадет в интервал значений $f = 0{,}9 \div 1{,}0$, составляет приблизительно 0,2 %. В этом случае, как указано выше, при наступлении перегрузки произойдет поломка наиболее слабого звена машины.

Необходимо заметить следующее:

разрушение наиболее слабого звена произойдет только тогда, когда превышение номинальной нагрузки на рабочем органе машины будет больше допускаемого по условиям прочности прироста нагрузки, действующей на наиболее слабое звено [11]. Например, при работе с сыпучими или вязкими технологическими средами в случае изменения силы сопротивления перемешиванию в определенных пределах вследствие изменения вязкости среды указанная сила увеличивается ограниченно, что может не привести к срабатыванию предохранительной муфты, если при случайном увеличении коэффициента трения момент сил трения муфты превышает внешний момент в приводе машины;

срабатывание предохранительной муфты при повышенном значении коэффициента трения, при котором, однако, не происходит поломки наиболее слабого звена привода, при многократном повторении может привести к его усталостному разрушению [12] вследствие действия повышенных механических напряжений при ограниченном цикле нагружений. Это соответствует общей картине эффективности предохранительных муфт по защите приводов от перегрузок, не превышающих допускаемые перегрузки;

при проектировании деталей и узлов приводов машин назначаются коэффициенты запаса прочности с учетом характера действующих нагрузок, свойств материалов деталей с учетом концентрации напряжений и т. д., т. е. не учитывается величина действующих перегрузок, спрогнозировать которые на практике затруднительно. В связи с этим чаще всего при эксплуатации приводов машин предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания эффективно ограничивает возникающие в приводе перегрузки при сохранении принятого коэффициента запаса прочности лишь при ограниченном значении коэффициента трения. Это значение, как правило, меньше максимального значения, которое коэффициент трения может принимать при эксплуатации.

Очевидно, что в этом случае применение АФМ взамен предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания будет эффективно с точки зрения защиты наиболее слабого звена привода машины уже при увеличении коэффициента трения выше значения, предельного для надежной защиты с помощью муфты обычной точности срабатывания. Для эффективной защиты наиболее слабого звена привода машины с помощью АФМ, предотвращающей его поломку, в интервале изменения коэффициента трения, включая его максимальное значение, точность срабатывания АФМ следует выбрать такой, при которой возникающие при перегрузках механические напряжения не превысят допускаемое значение в случаях, когда срабатывание АФМ происходит при максимальном значении коэффициента трения.

Пусть $K_т$ — коэффициент точности предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания [5]. Тогда действующие на наиболее слабое звено привода машины механические напряжения, соответствующие принятому значению $K_т$, будут пропорциональны максимальному значению предельного вращающего момента, при котором срабатывает муфта, если максимальное значение коэффициента трения равно прогнозируемому значению, т. е.

$$T_{max} = K_т T_н, \qquad (10)$$

где $T_н$ — номинальный (настроечный) вращающий момент муфты.

Если реальное значение коэффициента трения в процессе эксплуатации выше расчетного, то для обеспечения заданной прочности наиболее слабого звена привода машины предельный вращающий момент муфты не должен превышать T_{max}. Естественно, что предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания не способна надежно защитить наиболее слабое звено привода машины от поломок, поскольку назначенный запас его прочности недостаточен.

АФМ, имея более высокую точность срабатывания [2], обеспечит надежную защиту от поломок, если ее параметры будут удовлетворять определенным требованиям, которые сформулируем на основе следующих рассуждений.

Ve618.fm Page 19 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Величина предельного вращающего момента, передаваемого АФМ первого поколения (типа муфты Н. Д. Вернера) [2], определяется по формуле:

$$T_{\text{п}} = zF_{\text{п}}R_{\text{ср}}\frac{f_i}{1 + zCf_i}. \qquad (11)$$

Здесь z — число пар трения фрикционной группы муфты; $F_{\text{п}}$ — сила натяжения пружины (группы пружин), осуществляющей силовое замыкание пар трения; $R_{\text{ср}}$ — средний радиус поверхностей трения; f_i — текущий коэффициент трения; $C = \frac{R_{\text{ср}}}{r}\text{tg}\alpha$ — коэффициент усиления (КУ) устройства обратной связи, где α — угол давления чувствительных элементов устройства обратной связи; r — радиус окружности, на которой расположены чувствительные элементы.

Формула (11) записана для варианта АФМ первого поколения, имеющего все ведущие пары трения фрикционной группы.

Для данного варианта АФМ коэффициент точности можно определить по формуле (10), если заменить в ней параметр $T_{\text{н}}$ на $T_{\min}$ — минимальный предельный вращающий момент муфты. Это вполне корректно, поскольку, как показано в работе [6], для обеспечения эффективной работы привода настройка предохранительных фрикционных муфт (в том числе АФМ) должна осуществляться с учетом минимального коэффициента трения.

Согласно изложенному, формулу для определения коэффициента точности запишем в виде:

$$K_{\text{т1}} = \frac{T_{\max 1}}{T_{\min}} = \frac{f_{\max}(1 + zCf_{\min})}{f_{\min}(1 + zCf_{\max})}. \qquad (12)$$

Формула (12) записана с учетом формулы (11). В формуле (12) параметр $T_{\max 1}$ — максимальный вращающий момент, соответствующий фактическому значению коэффициента трения.

Для поставленного выше условия $T_{\text{н}} = T_{\min}$ АФМ первого поколения будет обеспечивать надежную защиту от поломок наиболее слабого звена привода машины при возникновении перегрузок, если справедливо равенство $T_{\max} = T_{\max 1}$. Из этого следует, что $K_{\text{т}} = K_{\text{т1}}$.

Номинальный (настроечный) вращающий момент предохранительной фрикционной муфты с обычной точностью срабатывания определяется по формуле [5]

$$T_{\text{н}} = zF_{\text{п}}R_{\text{ср}}f_{\min}. \qquad (13)$$

Соответственно формуле (13) получим:

$$T_{\max} = zF_{\text{п}}R_{\text{ср}}f'_{\max}, \qquad (14)$$

где $f'_{\max}$ — прогнозируемое максимальное значение коэффициента трения, по которому проводится расчет прочности деталей и узлов привода, в том числе наиболее слабого звена.

В формулах (13) и (14) при расчете силы $F_{\text{п}}$ учитывается коэффициент запаса при настройке АФМ [5].

С учетом формул (10), (13) и (14) найдем выражение для определения значения коэффициента точности:

$$K_{\text{т}} = f'_{\max}/f_{\min}. \qquad (15)$$

Этому же значению должен удовлетворять коэффициент точности $K_{\text{т1}}$ АФМ первого поколения, поэтому с учетом формул (12) и (15) запишем выражение для определения требуемого значения КУ:

$$C = \frac{f_{\max} - f'_{\max}}{zf_{\max}(f'_{\max} - f_{\min})}. \qquad (16)$$

Учитывая ограничение значения КУ в виде $C \le 5$ [13], а также выражение (16), найдем соотношение для определения коэффициента трения $f'_{\max}$:

$$f'_{\max} = \frac{(5zf_{\min} + 1)f_{\max}}{5zf_{\max} + 1}. \qquad (17)$$

Соотношение (17) показывает, что коэффициент трения $f'_{\max}$ возрастает по мере увеличения коэффициента трения $f_{\max}$. Формально значения этих параметров не связаны между собой, поэтому соотношение (17) отражает указанную связь при постоянном значении $K_{\text{т1}}$. Очевидно, что при изменении соотношения между $f'_{\max}$ и $f_{\max}$ коэффициент $K_{\text{т1}}$ должен измениться в соответствии с изменением согласно формуле (16) значения КУ.

Соотношение (17) показывает также, что с увеличением z уменьшается коэффициент трения $f'_{\max}$ (первая производная функции (17) по аргументу z — отрицательная). Фактически это означает, что при фиксированном значении $f'_{\max}$, что следует из его физического смысла, увеличение z приводит к уменьшению коэффициента точности $K_{\text{т1}}$ (см. формулу (12)). Это говорит о том, что при расчетах на прочность по меньшему значению $f'_{\max}$ требуется более высокая точность срабатывания АФМ при фиксированном значении коэффициента трения $f_{\max}$.

Кроме того, посредством изменения числа z пар трения можно установить требуемую точность срабатывания АФМ первого поколения, исходя из значений $f'_{\max}$ и $f_{\max}$ (см. формулы (12) и (15)).

Ve618.fm Page 20 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Требуемое значение коэффициента точности предохранительной муфты связано с коэффициентом n запаса прочности зависимостью [6]:

$$K_т \le 1 + \frac{n - \beta_н^2}{\beta_н}, \qquad (18)$$

где $\beta_н$ — коэффициент запаса сцепления [5].

В общем машиностроении обычно принимают $n = 2{,}4 \div 3{,}2$ [14], а $\beta_н = 1{,}25$ [5]. В этом случае по формуле (18) получим $K_т \le 1{,}67 \div 2{,}23$. Таким же должно быть изменение значения коэффициента трения (для предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания). Если значение коэффициента точности муфты не удовлетворяет соотношению (18), необходимо увеличивать запас прочности в соответствии с конкретным значением коэффициента точности.

Как указано выше, возникновение перегрузки в приводе машины является случайным событием, частоту появления которого трудно, а порой и невозможно прогнозировать. Действительно, в каждом конкретном случае физические причины возникновения перегрузки в приводе машины разнообразны и плохо поддаются анализу и оценке.

Далее будем считать, что распределение случайных событий в форме перегрузок подчиняется закону Пуассона с малой вероятностью события [7]. Тем самым подчеркивается минимальная величина экономического эффекта от применения АФМ, поскольку при более частых перегрузках увеличивается число поломок наиболее слабого звена привода машины в случае недостаточно эффективной защиты с помощью предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания.

Испытаниями будем считать:

один технологический цикл изготовления изделия, когда имеется в виду штучное производство продукции;

один цикл работы технологической или транспортной машины, связанный с переработкой технологической среды сплошной массы, с перемещением последней или штучных изделий. Циклом в последнем случае следует считать продолжительность одной рабочей смены или время, в течение которого осуществляется обработка технологической среды.

Положим, что единица технологического оборудования изготовляет в течение года $N = 5000$ изделий, а вероятность наступления перегрузки в каждом технологическом цикле $p = 0{,}002$.

Оценим вероятность возникновения одной перегрузки в течение года:

$$Np = \lambda = 1.$$

Учитывая полученный результат, найдем [7]:

$$P_п(k) = \lambda^k e^{-\lambda/k!} = 1/e = 0{,}368,$$

где k — число перегрузок в совокупности технологических циклов; $P_п(k)$ — вероятность появления события, заключающегося в наступлении одной перегрузки в течение года.

Ранее определена вероятность того, что коэффициент трения принимает значение, принадлежащее интервалу, близкому к максимальным значениям. Подставив полученные результаты в формулу (1), определим вероятность появления события, заключающегося в том, что предохранительная муфта в результате наступления перегрузки сработает при значении коэффициента трения, близком к максимальному:

$$q = 0{,}368 \times 0{,}002 = 0{,}000736.$$

Учитывая принятое выше число испытаний ($N = 5000$), найдем:

$$k = Nq = 5000 \times 0{,}000736 = 3{,}68.$$

Найденная величина означает, что срабатывание предохранительной муфты при коэффициенте трения, близком к максимальному значению или равном ему, может произойти в течение года 3—4 раза. В связи с этим при недостаточном уровне защиты соответственно произойдет столько же поломок наиболее слабого звена привода машины.

При необходимом и достаточном уровне защиты с помощью АФМ, когда значение КУ муфты удовлетворяет соотношению (16), поломка наиболее слабого звена привода машины не произойдет.

Положим, что вышедшая из строя в результате наступления перегрузки из-за недостаточного уровня защиты деталь заменяется запасной деталью. Тогда на основании формул (2), (4) и (6) имеем:

$$Q = t_п Q_ч + C_д + C_р. \qquad (19)$$

Приняв $t_п = 3$ ч, $Q_ч = 2350$ р., $C_д = 900$ р. и $C_р = 1800$ р., подставим эти данные в формулу (19), в результате чего получим $Q = 9750$ р. С учетом трех поломок детали сумма годовых издержек составит 29 250 р.

Предохранительные фрикционные муфты обычной точности срабатывания конструктивно проще и дешевле АФМ, поэтому данное обстоятельство необходимо учитывать при подсчете экономического эффекта от применения АФМ. В работе [3] показано, что стоимость материалов и работ по изготовлению предохранительных муфт, в том числе АФМ, приблизительно пропорциональна их конструктивной сложности. Поэтому АФМ дороже предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания в 1,5—1,6 раза (данные приведены для АФМ первого поколения).

Приняв стоимость предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания $C_м = 3800$ р., получим стоимость АФМ первого поколения $C'_м = 6080$ р. Если в результате приме-

Ve618.fm Page 21 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

нения АФМ взамен предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания возникают три поломки детали в год, экономический эффект по минимальным оценкам составит 21 570 р.

Наиболее слабое звено привода машины может разрушаться не только из-за действия однократных перегрузок, каждая из которых приводит к появлению в деталях напряжений, превышающих допускаемые напряжения, но и в результате часто повторяющихся перегрузок, величина каждой из которых меньше предельной однократной перегрузки, приводящей к разрушению. В этом случае разрушение наступает в результате усталости материала наиболее слабого звена привода машины.

Поскольку уровень перегрузок ниже, чем в рассмотренном выше случае, речь идет о срабатывании предохранительных муфт в интервале значений коэффициента трения $f'_{\max} < f_i < f_{\max}$. Очевидно, что частота появления события, характеризующегося наступлением перегрузки при значении коэффициента трения f_i, будет больше частоты срабатывания муфты при значениях коэффициента трения, близких к $f_{\max}$.

Приняв ранее указанные исходные данные, найдем:

$$\delta = f''_{\max} - f'_{\max} = 0{,}1,$$

где $f''_{\max}$ — значение коэффициента трения при его увеличении в небольших пределах.

Тогда $\sigma = 0{,}15$, а плотность распределения случайной величины (при $x = f''_{\max} = 0{,}6$) составляет $f(x) \approx 7{,}2$.

Вероятность того, что коэффициент трения принимает значение, принадлежащее интервалу $\Delta x = 0{,}1$, составляет

$$F(x, x + \Delta x) = 0{,}72.$$

В этом случае согласно формуле (1) имеем:

$$q = 0{,}368 \times 0{,}72 = 0{,}265.$$

С учетом принятого числа испытаний $N = 5000$ получим:

$$k = Nq = 5000 \times 0{,}265 = 1325.$$

Согласно полученному результату число срабатываний предохранительной муфты при значениях коэффициента трения, меньших максимального, существенно больше, чем при значении, равном или близком к максимальному коэффициенту трения. В данном случае наступление разрушения наиболее слабого звена привода вследствие усталости материала будет зависеть от значения коэффициента трения, при котором произойдет срабатывание муфты при указанном числе циклов нагружения.

В соответствии с усталостной кривой нагружения [14] меньшее число циклов нагружения, приводящее к усталостному разрушению наиболее слабого звена привода машины, будет соответствовать более высоким механическим напряжениям в звене и наоборот.

Соответственно этому в первом из указанных случаев предохранительная муфта будет срабатывать при более высоком коэффициенте трения, вызывающем более высокие нагрузки и механические напряжения в системе привода, а во втором случае — при более низком коэффициенте трения и, следовательно, при более низких нагрузках и механических напряжениях.

Естественно, что в данном случае речь идет о значениях коэффициента трения, более высоких, чем расчетные, и меньших, чем максимальный коэффициент трения. Возникающие при этом перегрузки будут меньше предельных нагрузок, но больше номинальных (расчетных) нагрузок.

Формула кривой усталости имеет следующий вид [14]:

$$\tau_{-1}^{m_\tau} N_б = \text{const}, \qquad (20)$$

где τ_{-1} — предел выносливости материала наиболее слабого звена привода машины; $N_б$ — базовое число циклов нагружения; m_τ — показатель степени при τ_{-1}; const — постоянная кривой усталости.

В формуле (20) предел выносливости — расчетное напряжение при кручении. Поскольку при срабатывании предохранительной муфты с повышенным значением коэффициента трения в наиболее слабом звене привода машины возникают повышенные механические напряжения, запишем:

$$\tau_i^{m_\tau} N_i = \text{const}, \qquad (21)$$

где τ_i — напряжение кручения в наиболее слабом звене привода, соответствующее нагрузке, ограничиваемой предохранительной муфтой при текущем значении коэффициента трения f_i; N_i — число циклов нагружений, соответствующее напряжению τ_i на кривой усталости.

Приравняв правые части соотношений (20) и (21), определим предельное число циклов нагружений по усталостной выносливости для изменившегося режима нагружения:

$$N_i = \left(\frac{\tau_{-1}}{\tau_i}\right)^{m_\tau} N_б. \qquad (22)$$

Из выражения (22) следует, что при безусловном $\tau_i > \tau_{-1}$ получим $N_i < N_б$. Положив $k = N_i$ и подставив в выражение (22) найденное выше значение k, найдем величину τ_i, соответствующую нагрузку в наиболее слабом звене привода машины и соответствующее значение коэффициента трения. Полученное значение коэффициента трения будет для

Ve618.fm Page 22 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания предельным значением коэффициента трения, при котором муфта сможет срабатывать k раз в течение года до наступления усталостного разрушения наиболее слабого звена привода машины. АФМ, имея более высокую точность срабатывания, обеспечит срабатывание при меньшей перегрузке и большем числе нагружений до наступления усталостного разрушения наиболее слабого звена привода машины.

Следовательно, и в данном случае АФМ обеспечивает более высокие работоспособность, долговечность и экономичность привода машины.

Таким образом, оценка экономической эффективности применения предохранительных муфт в приводах машин, основанная на учете прямого ущерба, связанного с поломками деталей, и косвенных материальных потерь, обусловленных снижением производительности технологического оборудования из-за его простоев в связи с устранением последствий выхода из строя деталей, показала влияние эксплуатационных характеристик муфт на общую сумму годовой экономии при эксплуатации машин.

Предохранительные муфты различных типов оказывают неодинаковое влияние на величину экономического эффекта в результате их применения в приводах машин. Исследование показало, что на сумму годового экономического эффекта главным образом влияет точность срабатывания предохранительных муфт. С повышением точности срабатывания при применении АФМ повышается экономический эффект от их использования.

Выводы

1. При оценке экономического эффекта от применения АФМ необходимо учитывать потери, связанные со снижением производительности машины вследствие простоев, вызванных необходимостью устранения последствий поломок.

2. При подсчете эксплуатационных издержек следует учитывать экономию на техническом обслуживании ремонтируемой машины и на энергоносителях и вспомогательных материалах, не расходуемых во время ремонта.

3. Экономический эффект от применения АФМ с точки зрения размеров эксплуатационных издержек зависит от вида технологической машины, стоимости одного часа ее работы, числа поломок в течение календарного срока при использовании в приводе машины предохранительной муфты обычной точности срабатывания.

4. Как правило, применение АФМ вместо предохранительной муфты обычной точности срабатывания следует считать экономически целесообразным уже при одной поломке наиболее слабого звена привода машины вследствие перегрузки.

5. Эффективным следует считать применение АФМ как в случае однократных, относительно редко повторяющихся перегрузок, так и при частых перегрузках, не приводящих к поломке наиболее слабого звена привода машины.

6. Для АФМ может быть установлено значение коэффициента точности, при котором муфта обеспечит надежную защиту от поломок наиболее слабого звена привода машины, если на основе эксплуатации будет определен фактический максимальный коэффициент трения. По установленному необходимому значению коэффициента точности определяют требующийся тип АФМ.

7. Разработана методика определения максимального значения коэффициента трения, при котором существует ограничение числа срабатываний предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания в течение года по критерию неразрушения наиболее слабого звена привода машины вследствие усталости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Шишкарев М. П.** О функциях адаптивных предохранительных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 7. С. 7, 8.

2. **Есипенко Я. И., Паламаренко А. З., Афанасьев М. К.** Муфты повышенной точности ограничения нагрузки. Киев: Техніка, 1972. 168 с.

3. **Шишкарев М. П.** Технико-экономические аспекты применения адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2003. № 5. С. 42—47.

4. **Детали машин**: Учеб. для машиностроит. вузов / В. А. Добровольский, К. И. Заблонский, С. Л. Мак и др. 7-е изд. М.: Машиностроение, 1972. 504 с.

5. **Поляков В. С., Барбаш И. Д., Ряховский О. А.** Справочник по муфтам. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1974. 352 с.

6. **Шишкарев М. П.** Эффективность применения адаптивных фрикционных муфт // Изв. вузов. Машиностроение. 2001. № 1. С. 27—31.

7. **Гмурман В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для втузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1977. 479 с.

8. **Крагельский И. В., Виноградова И. Э.** Коэффициенты трения. М.: Машгиз, 1962. 220 с.

9. **Афанасьев М. К.** Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев. 1971. 21 с.

10. **Химмельблау Д.** Анализ процессов статистическими методами: Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 957 с.

11. **Тепинкичиев В. К.** Предохранительные устройства от перегрузки станков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. 112 с.

12. **Феодосьев В. И.** Сопротивление материалов: Учеб. для втузов. 9-е изд., перераб. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 512 с.

13. **Запорожченко Р. М.** О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. 1971. № 1. С. 48—52.

14. **Жуков К. П., Гуревич Ю. Е.** Проектирование деталей и узлов машин. М.: Изд-во "Станкин", 1999. 615 с.

Ve618.fm Page 23 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.7-52 + 621.715.4

Р. Х. АХАТОВ, К. А. ОДНОКУРЦЕВ, кандидаты технических наук, Е. В. ЗЫКОВА (Иркутский национальный исследовательский технический университет), e-mail: axatob@istu.edu

Технология роботизированного позиционирования при сборке и монтаже конструкций

Разработана технология позиционирования деталей при сборке и монтаже конструкций с применением промышленного робота и лазерного трекера. Технология описана на примере монтажа сборочной оснастки для изделий авиационной техники.

Ключевые слова: координатное позиционирование, сборка, монтаж, промышленный робот, позиционер, лазерный трекер, сборочная оснастка, компенсация зазора.

The technology of parts positioning at assembly and installation of structures using an industrial robot and a laser tracker is developed. The technology is described on the example of assembly of assembly equipment for aviation technique products.

Keywords: coordinate positioning, assembly, installation, industrial robot, positioner, laser tracker, assembly equipment, gap compensation.

В современных условиях производства в различных отраслях машиностроения источником геометрической информации об изделии является его объемная электронная модель. По данным электронных моделей изготовляют как сами изделия авиационной техники, так и средства технологического оснащения для их производства. При этом по возможности применяется автоматизированное оборудование с ЧПУ, что обеспечивает перенос геометрической информации с электронной модели на конструкцию без участия человека. Это позволяет повысить качество изготовления изделий и сократить трудоемкость производства.

В то же время окончательные этапы производственного процесса — сборка и монтаж — сравнительно мало автоматизированы, в особенности для крупногабаритных изделий с повышенными требованиями к точности их изготовления. Для таких изделий сложно обеспечить требуемую точность пространственного положения деталей по методу допусков и посадок, что вынуждает применять весьма трудоемкую пригонку деталей или регулировку их взаимного положения.

Примером такой конструкции является сборочная оснастка для изделий авиационной техники [1]. На ведущих предприятиях авиационной промышленности безэталонный монтаж сборочной оснастки выполняется с использованием лазерного трекера для контроля точности монтажа, но установка монтируемых деталей сборочной оснастки осуществляется вручную методом регулировки за неопределенное число итераций. При этом отсутствует однозначно определенная последовательность действий по выполнению регулировки положения деталей, процесс достаточно трудоемкий, а точность и длительность монтажа во многом зависят от мастерства исполнителя.

Для решения перечисленных проблем в Иркутском национальном исследовательском техническом университете (ИРНИТУ) разработана технология автоматизированного позиционирования при сборке и монтаже конструкций, реализованная на примере сборочной оснастки [2]. Данная работа выполнена для Иркутского авиационного завода (ИАЗ) — филиала ПАО "Научно-производственная корпорация "Иркут" по договору № 389/12 от 15.11.2012 г., дополнительное соглашение № 6 "Разработка и внедрение комплекса автоматизированного монтажа сборочной оснастки", в рамках постановления Правительства Российской Федерации № 218 от 9 апреля 2010 г. (3 очередь).

Разработанный комплекс для автоматизированного монтажа сборочной оснастки состоит из следующих основных компонентов (рис. 1):

промышленного робота для автоматизированного позиционирования устанавливаемых деталей конструкции сборочной оснастки;

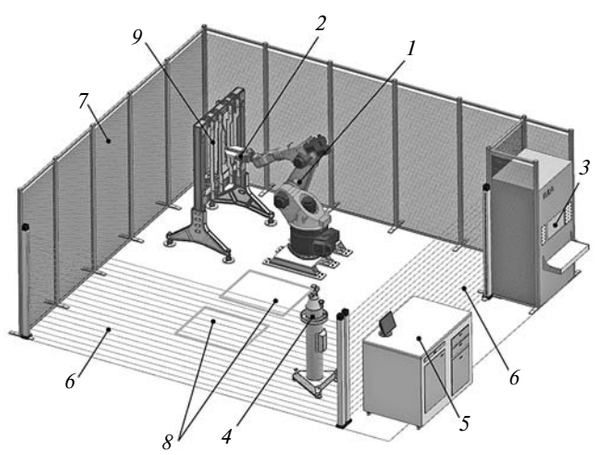


Рис. 1. Комплекс автоматизированного монтажа:

1 — промышленный робот; *2* — захват; *3* — система управления; *4* — лазерный трекер; *5* — стол оператора лазерного трекера; *6* — фоторелейные барьеры; *7* — металлические ограждения; *8* — дополнительные позиции для установки робота; *9* — монтируемая конструкция (сборочная оснастка)

Ve618.fm Page 24 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

лазерного трекера для выполнения автоматизированных координатных измерений;

системы управления, обеспечивающей автоматическое построение траектории перемещения при позиционировании детали на основе результатов координатных измерений.

Промышленный робот *1* перемещает устанавливаемую деталь сборочной оснастки из зоны загрузки в зону позиционирования, расположенную вблизи несущего каркаса сборочной оснастки, с последующим автоматическим позиционированием по заданным координатам. Он оснащен захватом *2*, обеспечивающим жесткое удержание устанавливаемой детали в ходе автоматического позиционирования, измерения координат и последующей фиксации детали на несущем каркасе сборочной оснастки.

Лазерный трекер *4* измеряет координаты заданных точек, расположенных на каркасе монтируемой конструкции, на промышленном роботе и на устанавливаемой детали. При измерениях используются типовые сферические отражатели SMR для лазерного трекера и установочные втулки для них с магнитным основанием. Лазерный трекер позволяет выполнить точную привязку робота к базовой системе координат сборочной оснастки, а также определить текущее положение устанавливаемой детали в пространстве и ее отклонения от номинального положения, заданного на исходной электронной модели в CAD-системе.

Система управления обеспечивает все необходимые перемещения промышленного робота, а также операции с захватом и средствами безопасности комплекса. При выполнении автоматического позиционирования система управления считывает отклонения устанавливаемой детали от номинального положения, полученные по результатам координатных измерений, и автоматически генерирует траекторию перемещения детали.

Процесс автоматизированного монтажа сборочной оснастки включает в себя две основные стадии: позиционирование монтируемого элемента роботом и последующую его фиксацию на каркасе сборочной оснастки. Источником данных для координатного позиционирования служит электронная модель конструкции сборочной оснастки, выполненная в CAD-системе пользователем либо автоматизированным способом [3].

Роботизированное позиционирование выполняется при условии, что предварительно определено взаимное положение систем координат (СК) лазерного трекера, промышленного робота и монтируемой конструкции (рис. 2). Сначала определяется базовая СК сборочной оснастки: измеряются лазерным трекером координаты нескольких (как правило, не менее 4) заданных точек на каркасе сборочной оснастки, и устанавливается по ним базовая СК в соответствии с данными CAD-модели. Затем измеряются лазерным трекером координаты управляемой точки инструмента робота в трех различных положениях манипулятора. Результаты измерений передаются в систему управления комплекса, где автоматически вычисляется положение базовой СК относительно робота.

Рис. 2. Схема согласования систем координат комплекса

Процесс роботизированного позиционирования детали включает следующие этапы:

1) взятие детали роботом в зоне загрузки;

2) перемещение детали роботом в зону позиционирования;

3) измерение координат детали лазерным трекером;

4) автоматическое позиционирование детали по результатам измерений.

Способ закрепления детали в захвате робота зависит от конструкции самой детали и от требований к ее установке на монтируемой конструкции. Большинство базирующих элементов в конструкции сборочной оснастки для авиастроения имеют значительные габаритные размеры и массы (например, ложементы, рубильники, плиты стыка). Возможность их автоматизированного позиционирования ограничена грузоподъемностью манипулятора. Поэтому целесообразно применять манипулятор сравнительно небольшой грузоподъемности для монтажа установочных элементов сборочной оснастки: кронштейнов (в виде вилок или проушин на плоском основании), посредством которых на каркас сборочной оснастки устанавливаются крупные базирующие элементы по отверстиям навески. Такие кронштейны имеют типовую конструкцию, относительно небольшие габаритные размеры и массу [4].

Для монтажа типовых установочных кронштейнов разработан монтажный адаптер (рис. 3), позволяющий жестко закрепить такой кронштейн в

Ve618.fm Page 25 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

захвате робота и измерять координаты заданных точек кронштейна лазерным трекером с требуемой точностью. Адаптер крепится на монтируемый кронштейн специальной монтажной осью по имеющемуся отверстию навески, и фиксируется от поворота штифтом.

Деталь в зону позиционирования перемещается роботом по заранее заданной траектории. Это позволяет исключить возможность случайных столкновений при последующем автоматическом позиционировании. Траекторию перемещения выбирает оператор из числа нескольких предварительно заданных траекторий в зависимости от номинального положения детали в конструкции, известного из CAD-модели. В результате предварительного перемещения монтируемый элемент должен оказаться на небольшом расстоянии (100÷500 мм) от заданного номинального положения, а его ориентация в пространстве должна примерно соответствовать номинальной с отклонением не более ±30° (рис. 4). Это позволяет повысить точность последующего автоматического позиционирования и снизить вероятность случайных столкновений с частями монтируемой конструкции.

Далее измеряют координаты выбранных управляемых точек детали лазерным трекером. При этом робот остается неподвижным, что позволяет открыть доступ в рабочую зону для человека. Для повышения точности и удобства выполнения измерений при монтаже отражатели лазерного трекера устанавливают на монтажном адаптере, обеспечивающем положение оси навески монтируемого кронштейна. Применение одного адаптера для монтажа различных деталей (типовых кронштейнов) позволяет повысить точность координатного позиционирования этих деталей. Данные, полученные в результате измерений, передаются в систему управления робота.

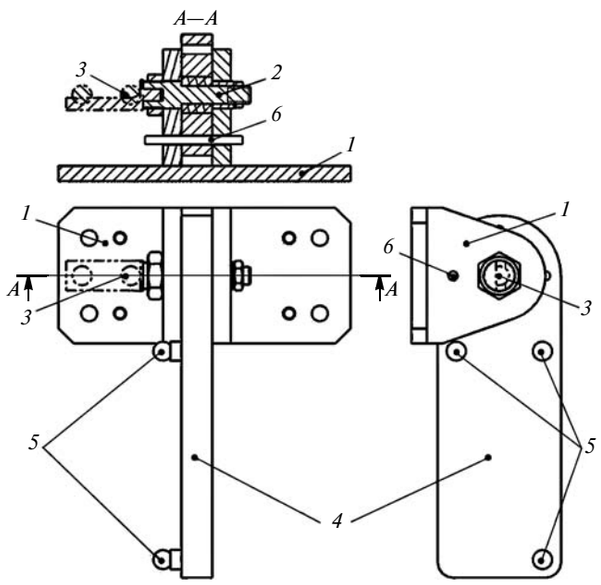


Рис. 3. Монтажный адаптер для типовых установочных кронштейнов:

1 — установочный кронштейн; *2* — монтажная ось; *3* — измерительная втулка для контроля координат оси с отражателями SMR; *4* — монтажный адаптер; *5* — измерительные втулки с отражателями SMR; *6* — штифт

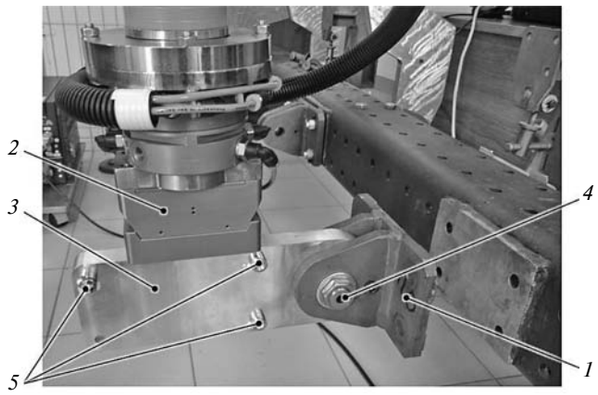


Рис. 4. Позиционирование детали роботом:

1 — монтируемая деталь (установочный кронштейн); *2* — захват робота; *3* — монтажный адаптер; *4* — монтажная ось; *5* — измерительные втулки и отражатель SMR

Автоматическое позиционирование выполняется роботом по траектории, сгенерированной системой управления. Эта траектория является уникальной и выполняется однократно, поскольку создается на основе результатов натурных координатных измерений, выполненных лазерным трекером ранее (рис. 5). Вследствие этого за одну итерацию позиционирования может не обеспечиваться заданная высокая точность положения детали (в ходе опытных работ требовалось обеспечить точность ±0,1 мм). Поэтому автоматическое позиционирование выполняется за две итерации: основную и корректирующую, для каждой из которых выполняются отдельные координатные измерения и генерируется новая уникальная траектория [5].

На первой (основной) итерации точность позиционирования соответствует точности привязки робота к базовой СК. В реальных производственных условиях она зависит от погрешностей юстировки робота, калибровки его инструмента, измерений лазерным трекером (включая погрешности измерительных адаптеров). При выполнении опытных работ отклонения позиционирования после первой итерации составляли до ±1 мм.

На второй (корректирующей) итерации выполняется коррекция положения устанавливаемой детали по результатам повторных координатных измерений лазерным трекером. При этом устраняются большинство погрешностей манипулятора и отклонения расположения его системы координат,

Ve618.fm Page 26 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

и точность второй итерации позиционирования фактически соответствует повторяемости промышленного робота. В ходе опытных работ отклонения после второй итерации составляли до ±0,05 мм.

По окончании автоматического позиционирования выполняется контроль координат детали лазерным трекером. Если отклонения детали от заданного положения не превышают допустимых значений, то она фиксируется на монтируемой конструкции.

Чтобы сократить длительность использования робота при выполнении монтажа, процесс фиксации устанавливаемой детали разделен на два этапа:

1) предварительная фиксация, при выполнении которой робот удерживает деталь в заданной позиции, полученной в результате автоматического позиционирования;

2) окончательная фиксация без использования робота для обеспечения необходимой прочности закрепления устанавливаемой детали на монтируемой конструкции.

При предварительной фиксации происходит первоначальное закрепление детали, удерживаемой роботом неподвижно, на монтируемой конструкции. При монтаже сборочной оснастки, как правило, требуется заполнить компенсационный зазор между площадкой на каркасе сборочной оснастки и основанием монтируемой детали и закрепить деталь болтами или другим способом [6]. При этом недопустимо прикладывать к устанавливаемой детали существенные неуравновешенные нагрузки в

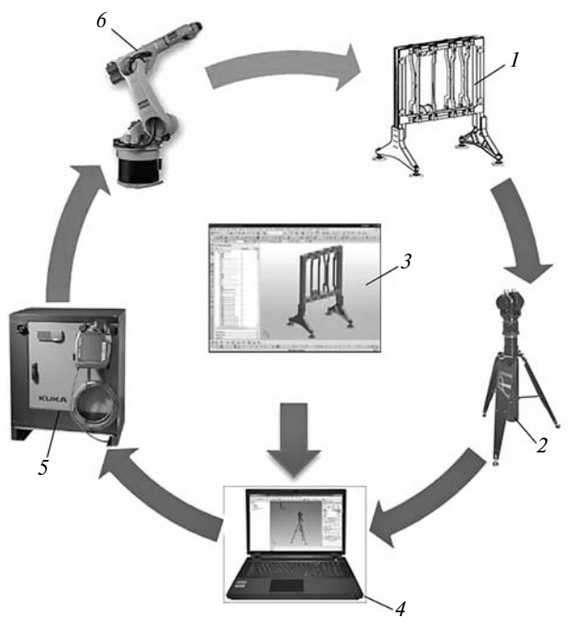


Рис. 5. Схема автоматического координатного позиционирования:
1 — монтируемая конструкция; *2* — лазерный трекер; *3* — CAD-система; *4* — специальный анализатор; *5* — система управления; *6* — робот

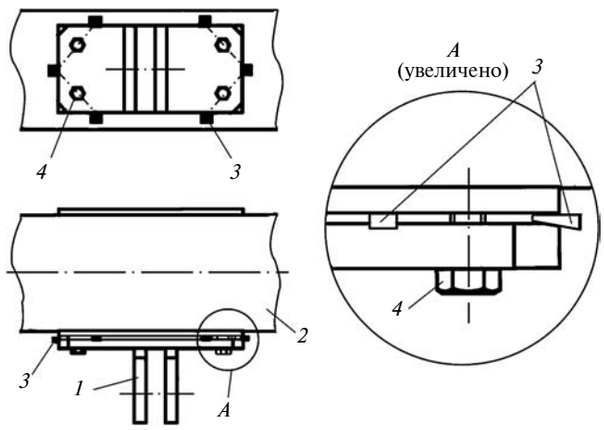


Рис. 6. Схема предварительной фиксации детали:
1 — монтируемый кронштейн; *2* — несущий каркас сборочной оснастки; *3* — клиновидные прокладки; *4* — фиксирующие болты

процессе фиксации, поскольку это приведет к отклонению детали от положения, заданного при позиционировании. По этой же причине недопустимо применять дополнительную регулировку положения детали по окончании ее позиционирования.

В современных условиях на авиастроительных предприятиях при безэталонном монтаже сборочной оснастки для заполнения компенсационного зазора применяют плоские прокладки, а основание монтируемой детали (установочного кронштейна) фиксируют болтами на каркасе сборочной оснастки. Данный способ не удовлетворяет изложенным выше требованиям к операции предварительной фиксации, поскольку необходим экспериментальный подбор толщины компенсирующих прокладок (с временным отведением устанавливаемой детали от заданного положения).

На предприятиях также применяется способ фиксации деталей сборочной оснастки с применением домкратных (упорных) винтов, обеспечивающих заданный компенсационный зазор. При установке таких винтов регулируется положение монтируемой детали, что недопустимо в условиях автоматического позиционирования. Кроме того, данному способу свойственны высокая трудоемкость, а также локальные деформации поверхности установочной площадки на каркасе конструкции под концами домкратных винтов при их затяжке.

Специально для условий роботизированного позиционирования был разработан способ предварительной фиксации с применением клиновидных прокладок, которые устанавливают в компенсационный зазор между основанием монтируемой детали и установочной площадкой на каркасе сборочной оснастки (рис. 6) [7].

Клиновидные прокладки устанавливаются в компенсационный зазор по месту без изменения положения монтируемой детали и без дополнитель-

Ve618.fm Page 27 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

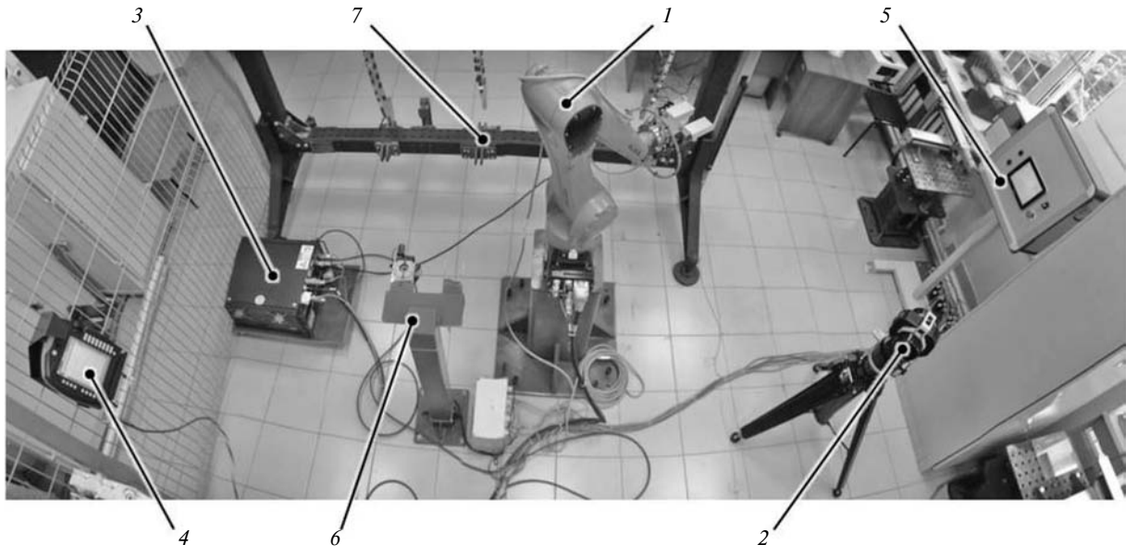


Рис. 7. Лабораторное исполнение разработанного комплекса:
1 — робот; *2* — лазерный трекер; *3* — контроллер робота; *4* — мобильный пульт оператора; *5* — панель оператора; *6* — магазин сменных захватов; *7* — монтируемая конструкция

ной подгонки или регулировки, и фиксируются быстросохнущим клеем. Затем основание монтируемого элемента фиксируется болтами на каркасе сборочной оснастки. Затяжка болтов выполняется итерационно, с постепенным повышением момента затяжки от минимального (3÷4 Н · м) до необходимого значения (20 Н · м и выше), чтобы снизить неравномерность приложения нагрузок к монтируемой детали в процессе фиксации.

В результате предварительной фиксации монтируемый кронштейн закреплен на каркасе сборочной оснастки достаточно надежно, что позволяет отпустить захват промышленного робота. Робот возвращается в домашнюю позицию по траектории, построенной автоматически через промежуточные точки, пройденные при перемещении в зону позиционирования.

Окончательная фиксация монтируемой детали на каркасе сборочной оснастки выполняется типовым для технологии безэталонного монтажа способом. Часть компенсационного зазора, не занятая клиновидными прокладками, заполняется пластическим связующим веществом, имеющим после застывания необходимую прочность (например, полимерной смолой с целлюлозным заполнителем). От сдвига в плоскости основания монтируемая деталь удерживается двумя штифтами, которые устанавливаются в отверстия, просверленные по месту. Такой способ обеспечивает необходимую прочность закрепления монтируемых деталей на конструкции.

Разработанный комплекс автоматизированного монтажа выполнен в двух исполнениях, отличающихся составом оборудования (таблица):

в научно-исследовательской лаборатории "Высокоточная сборка и монтаж конструкций и сооружений" в ИРНИТУ (рис. 7) [8];

на опытном участке на ИАЗ — филиале ПАО "Корпорация "Иркут" (см. рис. 1).

Состав оборудования комплекса автоматизированного монтажа

Оборудование и характеристики	Исполнение комплекса	
	лабораторное (ИРНИТУ)	опытное (ИАЗ)
Промышленный робот	KUKA KR10 R1100 sixx	KUKA KR60 HA
Система управления	KUKA KR C4 Compact	KUKA KR C4
Захватное устройство	1) SCHUNK PGN-plus 125/2 2) VERO-S NSR mini 100	SCHUNK PGN-240/1
Лазерный трекер	API Tracker3	API Tracker3
Программное обеспечение для координатных измерений	Spatial Analyzer	Spatial Analyzer
Масса монтируемых элементов, кг	5	15
Точность позиционирования, мм	±0,05	±0,05
Окончательная точность монтажа, мм	±0,1	±0,1

Ve618.fm Page 28 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Разработанная технология автоматизированного монтажа испытана в лабораторных условиях в ИРНИТУ и на опытном участке на ИАЗ — филиале ПАО "Корпорация "Иркут". При монтаже типовых рубильников и ложементов сборочной оснастки достигнута точность ±0,1 мм, а длительность автоматизированного монтажа каждого из них не превысила 1,5 ч. При этом каждый рубильник или ложемент устанавливался в сборочной оснастке на двух кронштейнах типа "вилка" с плоским основанием (см. рис. 3), которые монтировались с применением промышленного робота. Длительность автоматизированного монтажа каждого кронштейна не превышает 40 мин, а точность их установки составляет ±0,05 мм.

Разработанный комплекс и технология автоматизированного монтажа сборочной оснастки имеют следующие преимущества перед существующей технологией безэталонного монтажа:

стабильная точность монтажа вследствие повышения объективности процесса;

автоматическое позиционирование монтируемых элементов по единому алгоритму, за две итерации (основную и корректирующую);

фиксация монтируемых элементов без дополнительной регулировки и пригонки, с сохранением позиции, заданной в результате позиционирования.

При этом требуются минимальные изменения конструкции установочных элементов сборочной оснастки, изготовленной для условий безэталонного монтажа. Также возможен автоматизированный монтаж сборочной оснастки, ранее смонтированной по эталону, при условии выполнения на ней носителей измеряемых точек и определения их координат для монтажного положения сборочной оснастки.

Ограничением, сдерживающим внедрение разработанного комплекса и технологии, являются большие габаритные размеры и масса промышленного робота. Опытный участок автоматизированного монтажа выполнен стационарным, что вызывает необходимость перемещения каждого сборочного приспособления для монтажа на этот участок, а после монтажа возвращения обратно в сборочный цех. Возможно создание мобильного роботизированного технологического комплекса, но его применение будет ограничено из-за плотного расположения сборочных приспособлений в цехах агрегатной сборки, а также из соображений безопасности выполнения работ.

Тем не менее созданный комплекс может быть использован для позиционирования деталей при сборке и монтаже различных конструкций в пределах его грузоподъемности и габаритов рабочей зоны. Для переналадки комплекса на другой тип деталей достаточно заменить монтажный адаптер. Таким образом, разработанная технология автоматизированного монтажа может найти применение не только в авиационной промышленности, но и при высокоточном монтаже и сборке различных конструкций в других отраслях промышленности. В целом же разработанная технология позиционирования применима даже для крупногабаритных и массивных конструкций при замене робота на автоматизированную систему позиционирующих приводов, спроектированную с учетом особенностей монтируемой конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Ахатов Р. Х., Говорков А. С.** Современные методы и средства монтажа сборочной оснастки: Учебно-методич. пособие. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2011. 76 с.

2. **Ахатов Р. Х., Однокурцев К. А., Зыкова Е. В.** Технология монтажа сборочной оснастки с применением промышленного робота // Известия Самарского науч. центра РАН. 2014. Т. 16. № 1 (5). С. 1284—1291.

3. **Чимитов П. Е., Лаврентьева М. В.** Интегрированная система создания электронной модели авиационной сборочной оснастки // Известия Самарского науч. центра РАН. 2014. Т. 16. № 1 (5). С. 1640—1646.

4. **Чимитов П. Е.** Концепция автоматизированного проектирования средств технологического оснащения сборочного производства // Вестник Иркутского ГТУ. 2011. № 12 (59). С. 52—57.

5. **Однокурцев К. А., Сокольников Р. А.** Методика позиционирования при автоматизированном монтаже сборочной оснастки // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: Сб. ст. VII Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 13—16 апреля, 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 350—354.

6. **Зыкова Е. В.** Использование сварки при фиксации базирующих элементов с обеспечением высокой точности позиционирования // Тенденции формирования науки нового времени: Сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (18 октября 2014 г., г. Уфа). Уфа: РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2014. С. 22—26.

7. **Зыкова Е. В., Ерофеев М. С.** Способы фиксации элементов сборочной оснастки при автоматизированном монтаже // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: Сб. ст. VII Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 13—16 апреля, 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 291—296.

8. **Зыкова Е. В.** Техническое оснащение лабораторного стенда для отработки автоматизированного позиционирования элементов сборочной оснастки // Высокие технологии, фундаментальные исследования, экономика. Т. 2: Сб. ст. двенадцатой междунар. науч.-практ. конф. "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (8—10 декабря 2011 г., г. Санкт-Петербург) / Под ред. А. П. Кудинова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 341—348.

Ve618.fm Page 29 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.81

Е. В. ШАЛОБАЕВ, канд. техн. наук (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики), А. С. ДЕМИНА (ПАО "Силовые машины"), e-mail: shalobaev47@mail.ru

Способ повышения надежности крупного высокооборотного оборудования

Рассмотрен способ повышения надежности защиты крупногабаритного высокооборотного оборудования от самопроизвольного повышения частоты вращения. Для этого в автомат безопасности, осуществляющий защитную функцию, предлагается встраивать интеллектуальный мехатронный модуль с системой определения состояния поверхностей элементов конструкции, что исключает участие оператора в проверке работоспособности автомата безопасности.

Ключевые слова: механический автомат безопасности, надежность, интеллектуальный мехатронный модуль, крупное высокооборотное оборудование.

The method for reliability protection increasing of large-scale high-speed equipment from spontaneous raising of the rotational speed is considered. For this purpose, it is proposed to integrate an intelligent mechatronic module with the system for determining the state of the surfaces of structural elements in the safety automaton carrying out a protective function, which excludes the participation of an operator in checking the operability of the safety device.

Keywords: mechanical safety automat, reliability, intelligent mechatronic module, large high-speed equipment.

Любое крупное высокооборотное оборудование нуждается в противоразгонной защите, поскольку при бесконтрольном повышении частоты вращения в агрегате происходят повреждения, требующие дорогостоящего ремонта. В некоторых случаях возможны даже человеческие жертвы.

К оборудованию такого типа относится паротурбинный агрегат, устанавливаемый на электростанциях. Самопроизвольный разгон турбины может стать причиной серьезных поломок, таких как обрыв рабочих лопаток (появление дисбаланса на роторе), механические повреждения ротора, разлом подшипников, выброс масла и, как следствие, пожар и обрушение кровли машинного зала.

После такой аварии очень часто требуется полная замена агрегатов машинного зала. Поэтому защита от разгона является важной функцией системы регулирования и защиты крупного высокооборотного оборудования [1, 2].

Как известно, надежность — это основное требование, которому должна отвечать любая система защиты. Надежная система защиты от повышения частоты вращения должна обладать высоким быстродействием, чтобы при разгоне с максимальной интенсивностью не допустить резкого увеличения частоты вращения до значения, опасного для данного агрегата. До появления электронных систем, чувствительным элементом этой защиты на всех без исключения паротурбинных установках являлся механический автомат безопасности (МАБ). А поскольку на многих электростанциях все еще применяется такая защита, актуальным является вопрос о возможности повысить ее надежность, используя современные достижения науки и техники.

Основным недостатком МАБ является необходимость периодически проводить его проверку путем разгона самого турбоагрегата до уставленной частоты срабатывания МАБ (свыше 3000 мин$^{-1}$). Такие проверки снижают ресурс работы турбинного агрегата и являются источником рисковых ситуаций на станции.

Чтобы исключить необходимость корректировки режимов работы турбины при проведении проверки МАБ, предлагается установить его в собственных подшипниках. Тогда проверку разгоном можно будет проводить вращением от внешнего двигателя, отсоединив МАБ от ротора турбины (рис. 1), что исключит необходимость разгонять турбоагрегат [3]. Это позволит проводить проверки МАБ чаще, повышая тем самым его надежность.

На рис. 1 представлена схема МАБ, установленного в собственных подшипниках, что позволяет проводить его проверку разгоном при работающем турбоагрегате. К валу турбоагрегата *1* после переднего подшипника *2* крепится вал МАБ через шлицевое соединение *3* и электромагнитную либо обгонную муфту *4*. Вал МАБ установлен в собственных подшипниках *5*. Части механического датчика *6* частоты вращения установлены в специальных расточках, выполненных внутри вала. Вращение вала МАБ осуществляется с помощью интеллектуального мехатронного модуля (ИММ) *7*. При срабатывании механического датчика его бойки воздействуют на рычаги 9 (рис. 2), от которых воздействие передается в гидравлическую систему управления запорными органами турбины.

Для сокращения непосредственного участия человека в испытании МАБ в собственных подшипниках повышением частоты вращения целесообразно использовать электроприводный ИММ [4—10], который обеспечит упрощение процедуры испытания МАБ.

Ve618.fm Page 30 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

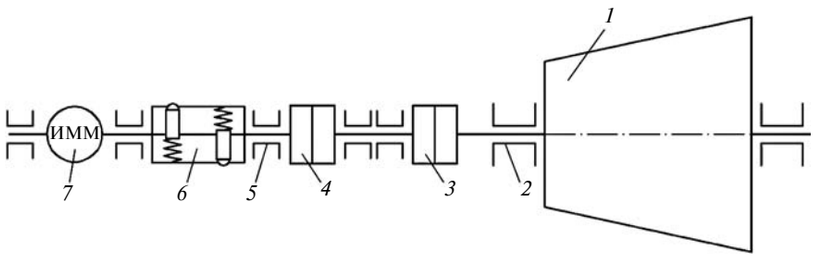


Рис. 1. Механический автомат безопасности, установленный в собственных подшипниках

Неисправности защитных устройств разделяются на два типа: ложные срабатывания и отказы, вызывающие неправильное действие защиты во время аварийной ситуации. В нормальном режиме работы оборудования защитные устройства не оказывают никаких воздействий на систему. Поэтому работоспособность таких устройств не может быть определена по характеру работы основного оборудования. Для выявления отказов включенной аппаратуры необходимы специальные проверки. Для примера рассмотрим паротурбинные агрегаты для АЭС. Они имеют непрерывный длительный режим работы, поэтому проверки защиты турбины необходимо проводить во время работы турбины под нагрузкой, блокируя воздействие испытуемой защиты на отключение турбины.

Расчеты надежности основаны на методах теории вероятностей, которые применяются к массовым (т. е. многочисленным однотипным) объектам. Только в этом случае проявляется закономерная связь между полученными из опыта статистическими характеристиками и вероятностной мерой. Крупное энергетическое оборудование в отличие, например, от изделий электронной промышленности не дает оснований для такого вероятностного подхода. Предметом расчета может быть только математическая модель, относительно которой вопрос о закономерности применения вероятностных методов не возникает — модель всегда можно представить реализованной во многих экземплярах. Но тогда и результаты расчета характеризуют не саму конкретную конструкцию, а лишь те ее принципиальные особенности, которые отражены в модели. И дело здесь не в точности модели, а в том, что показатели надежности, полученные при эксплуатации единичного образца или немногих экземпляров, могут из-за случайных причин существенно отличаться от средних значений для большого числа экземпляров, которые только и могут быть получены расчетом.

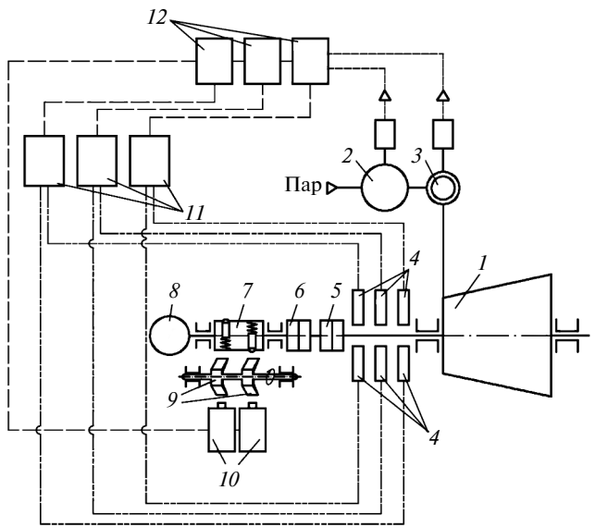


Рис. 2. Принципиальная схема комбинированной защиты турбоагрегата от самопроизвольного разгона:

1 — турбина; *2* — стопорный клапан с сервомотором; *3* — регулирующий клапан с сервомотором; *4* — аналоговые датчики частоты вращения; *5* — шлицевое соединение; *6* — разъемная муфта с дистанционным управлением; *7* — механический датчик частоты вращения; *8* — интеллектуальный мехатронный модуль; *9* — рычаги; *10* — золотники регулятора безопасности; *11* — электромагнитные выключатели; *12* — золотники отключения турбины

Чтобы контрольные проверки действительно проводились достаточно часто, необходимо построение системы защиты, позволяющее наиболее просто проводить всеобъемлющую проверку. Кроме того, при достаточно частых проверках недопустимо, чтобы во время проверок основное оборудование (турбина) оставалось вообще без защиты.

Повысить надежность работы защиты от превышения частоты вращения быстро вращающегося оборудования можно посредством использования двух разнородных каналов — механического и электронного. Таким образом, во время испытания МАБ агрегат не останется без защиты, так как в работе будет находиться электронный автомат безопасности.

Вариант системы защиты турбоагрегата от разгона, в котором будут совмещены механический и электронный автоматы безопасности (см. рис. 2) представляется наиболее выгодным, поскольку в таком варианте МАБ является дублирующим в случае отказа электронного автомата, при условии, что установочная частота срабатывания МАБ будет выше.

Согласно рис. 2 МАБ представляет собой резервированную двухканальную систему.

Отказ зарезервированной системы можно рассматривать как наложение двух редких событий и считать практически невероятным только в том случае, если речь идет о достаточно коротком периоде эксплуатации.

Вполне вероятно, что, например, сегодня откажет один элемент, а через год, допустим, второй —

Ve618.fm Page 31 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

резервный и система защиты окажется неработоспособной. Отсюда становится ясным значение контрольных проверок защиты как необходимого, наряду с резервированием защитных устройств, средства для обеспечения надежности защиты. Возникший отказ должен быть обнаружен и устранен прежде, чем возникнет новая неисправность.

Примем, что все элементы защиты — высококачественны и проходят необходимую проверку.

Тогда вероятность отказа какого-либо элемента будет достаточно малой величиной ($10^{-3} \div 10^{-4}$) за характерный промежуток времени [10]. При этом вероятность отказа одновременно двух и более элементов, что необходимо для отказа зарезервированной системы, будет представлять собой малую величину высшего порядка малости [11]. Это означает, что отказ системы защиты есть событие практически невероятное.

Предположим, что поток неисправностей каждого устройства защиты состоит из двух взаимнонезависимых потоков — потока ложных срабатываний и потока отказов. Это предположение оправдывается тем, что, как правило, отмеченные два вида неисправностей вызываются выходом из строя разных элементов, независимых в смысле их отказов. Каждый из двух потоков любого из устройств будем считать простейшим, не зависящим ни от состояния остальных устройств, ни от потока аварийных ситуаций.

Допущение о простейшем характере потока отказов является приемлемой идеализацией, если процессы изнашивания и старения не играют большой роли. Это в известной мере имеет место для обслуживаемого оборудования, поскольку задачей обслуживания является поддержание примерно постоянного уровня его работоспособности.

Относительно структуры схемы защиты будем исходить из структуры, показанной на рис. 2, т. е. считаем единичное защитное устройство минимальным элементом системы защиты, имеющим отличную от 1 вероятность безотказной работы.

Та или иная более сложная схема защиты образуется из нескольких однотипных единичных устройств.

Устройства коммутации или логические элементы, необходимые для образования сложной схемы из единичных защитных устройств, считаем совершенно надежными [12]. Также совершенно надежными считаем исполнительные органы защиты (электромагнитные выключатели).

Надежность схемы защиты будем характеризовать вероятностью безаварийной работы (т. е. без отказов защиты в аварийных ситуациях) за заданный срок эксплуатации оборудования или вероятностью аварий за тот же срок:

$$G_2(t) = \{G_1(K) \times G_0(K, L)\}^{\frac{t}{K+L}}, \qquad (1)$$

где $G_1(K)$ — вероятность безаварийной работы за промежуток времени между проверками защиты; $G_0(K, L)$ — вероятность безаварийной работы в процессе проверки защиты; t — заданный срок эксплуатации; K — промежуток времени между контрольными проверками защиты (от окончания предыдущей до начала следующей); L — продолжительность проверки (считаем постоянной, одинаковой во всех случаях); $K + L$ — полный цикл (период) между проверками.

Имея в виду достаточно частые проверки, считаем, что все они проводятся во время работы под нагрузкой. Для резервированной двухканальной схемы ограничимся периодом проверок $K + L = 0{,}02$ г. (один раз в неделю) и примем продолжительность проверки $L = 0{,}0001$ г., т. е. около 50 мин. Частота случаев аварийных ситуаций составит $\lambda = 1$ ав./г. (т. е. один случай в среднем за год); частота отказов одного устройства защиты — $\mu = 0{,}4$ от./г. (т. е. один отказ данного устройства в среднем за 2,5 года).

Зададим срок эксплуатации $t = 10$ лет. Тогда согласно формуле (1) $G_2(10) = 0{,}9984$.

На работающих турбоагрегатах в реальных условиях такие проверки проходят один раз в 4 мес. ($K + L = 0{,}3$ г.). В этом случае получим $G_2(10) = 0{,}683$.

Важной также является задача обнаружения того элемента, который послужил причиной неисправности МАБ.

Одним из возможных методов бесконтактной диагностики дефектов, связанных с коррозионным и эрозионным износами, является метод тепловизионной спектроскопии, позволяющий дистанционно выявлять такие дефекты поверхности [13].

Выводы

В предложенной схеме, комбинирующей механический и электронный автоматы безопасности, агрегат не остается без защиты, поэтому нет снижения надежности в области частых проверок — во всем диапазоне периода проверок вероятность безаварийной работы возрастает.

Применение мехатронного модуля с инновационной системой определения состояния поверхностей элементов конструкций в МАБ позволяет решить проблему повышения его надежности. Процедура проверки с таким модулем становится автоматической и может выполняться достаточно часто, чтобы обеспечить высокую надежность крупного высокооборотного оборудования.

Ve618.fm Page 32 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.7.011

М. Я. БРОВМАН, д-р техн. наук (ОАО "Оснастка", г. Тверь),
e-mail: brovman@mail.ru

Усовершенствование технологии изготовления трубопроводов для транспортировки газов и жидкостей

Предлагается технология совместной деформации концевых участков двух соединяемых труб экспандированием и их сварки в деформированном состоянии. Это позволит устранить образование ступенек на стыке, повышающих гидравлическое давление, и улучшить качество трубопроводов.

Ключевые слова: трубопровод, сварка, экспандирование, устранение дефектов.

The technology of joint deformation of the end sections of two connected pipes by expansion and their welding in a deformed state is proposed. This will eliminate the formation of steps at the junction, increasing the hydraulic pressure, and improve the quality of pipelines.

Keywords: pipeline, welding, expansion, defects elimination.

Повышение качества трубопроводов для транспортировки газов и жидкостей имеет большое экономическое значение. Как правило, расстояния от мест добычи газа и нефти до потребителя продукции весьма значительны, и именно трубопроводы часто являются основным средством транспортировки до 75÷85 % нефти и до 95÷100 % природного газа, а также транспортировки других газов, например аммиака.

Вопросам изготовления, расчета и эксплуатации труб посвящены работы [1—7], в которых проведен анализ качества труб и технологии их изготовления. В настоящее время объем потребления природного газа в мировой экономике составляет около 3,5 трлн м^3 в год и по прогнозам ПАО "Газпром" в ближайшие 15 лет возрастет еще на 30 % [8]. Поэтому вопросы повышения качества трубопроводов имеют весьма большое значение для экономики многих стран.

Проблемы низкого качества трубопроводов

Трубы ∅700÷1500 мм, как правило, изготовляют гибкой стальных листов (вальцовкой) с последующей сваркой продольным сварным швом (иногда гибкой двух полуцилиндров со сваркой двумя продольными швами). Однако ввиду низкой точности полученных труб заводы-изготовители применяют операцию экспандирования, разработанную фирмой SMS Meer [6—9].

В трубу *1* (рис. 1) вводят экспандер — узел, содержащий до 10—12 сегментов (твердых тел), которые в трубе перемещают в радиальном направлении. На рис. 1, *а*, *б* показано положение сегментов соответственно при введении в трубу (до начала ее де-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 29)

Кроме того, благодаря использованию описанного решения достигается экономический эффект, составляющий не менее 5 % от затрат, связанных с обслуживанием оборудования, что подтвердил технико-экономический расчет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Electronic** safety device as an element of protection of the turbine unit / Н. З. Беликова, О. А. Юланов, В. М. Гладченко и др. // Электрические станции. 2005. № 5. С. 40—46.

2. **Scott L. T., Sheldon S. S.** Turbine Overspeed systems and requied response times // Proceedings of the thirty-eighth turbomachinery symposium. 2009. P. 157—167.

3. **Фрагин М. С.** Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшая перспектива. Сер. "Проблемы энергетики". Вып. 6. СПб.: Энерготех, 2005. 248 с.

4. **Шалобаев Е. В.** Теоретические и практические проблемы развития мехатроники: Сб. науч. статей / Под ред. С. А. Козлова. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. 376 с.

5. **Шалобаев Е. В.** К вопросу определения мехатроники и иерархии мехатронных объектов // Датчики и системы. 2001. № 7. С. 64—67.

6. **Егоров О. Д., Подураев Ю. В.** Конструирование мехатронных модулей: Учебник. 2-е изд. испр. и доп. М.: Изд-во "Станкин", 2005. 368 с.

7. **Подураев Ю. В.** Мехатроника: основы, методы, применение: Учебник. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2007. 256 с.

8. **Таугер В. М.** Конструирование мехатронных модулей: Учеб. пособ. для студентов специальности 220401 — "Мехатроника". Екатеринбург: УрГУПС, 2009. 336 с.

9. **Малев В. В.** Надежность защитных устройств // Автоматика и телемеханика. 1965. Т. 26. Вып. 9. С. 1606—1613.

10. **Половко А. М., Гуров С. В.** Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.

11. **Половко А. М., Гуров С. В.** Основы теории надежности: Практикум. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 560 с.

12. **Половко А. М.** Принципы построения абсолютно надежных технических устройств. СПб.: Знание, 1993. 24 с.

13. **Пат. 2626227 Рос. Федерация.** Способ определения дефектов материала.

Ve618.fm Page 33 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

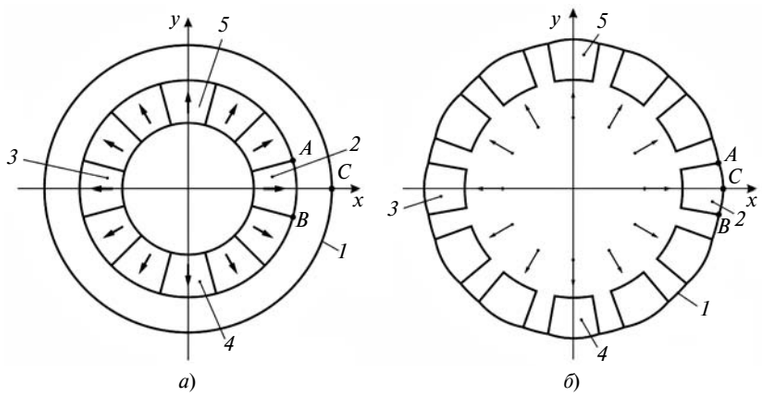


Рис. 1. Схемы положения сегментов до (*а*) и после (*б*) деформирования труб

формации) и после деформации растяжением. Например, сегменты *2* и *3* перемещают параллельно оси *x* в противоположных направлениях, а сегменты *4* и *5* — параллельно оси *y*. Поверхность *AB* сегмента *2* соприкоснется с трубой *1* в точке *C* и после деформации сформируется участок *ACB* трубы. Участки трубы между сегментами имеют переменную кривизну. Технология получила широкое применение [9—13].

Схема конструкции экспандера приведена на рис. 2 [6, 13] (можно применять экспандеры других конструкций). Клинья *1* при движении вдоль оси экспандера обеспечивают радиальное перемещение сегментов *2*. Для уменьшения овальности труб предназначена инструментальная головка *3*, а для регулирования кривизны труб — инструментальные ролики *4*. Этот узел соединен специальной тягой с деталью *5* [9—13]. Для уменьшения деформации изгиба детали необходимы дополнительные опоры. Также предусмотрены ролик *6* в опорном узле и дополнительные опоры поперечины *7*, вставки *8* и опорный ролик *9*, расположенный в станине *10* [13]. Когда трубу надвигают на инструментальную головку *3*, опоры поперечины *7* убирают с помощью гидравлических цилиндров.

Перед началом деформирования трубы для ее экспандирования все детали экспандера настраивают на размер, соответствующий размеру обрабатываемой трубы. Длина участка трубы, деформируемого за один цикл, определяется длиной экспандера. После разгрузки сегменты отводят от стенок трубы и перемещают экспандер по ее длине. Затем повторяют операцию расширения трубы экспандированием.

Число шагов экспандера зависит от его длины l и длины L трубы. При этом число шагов не должно быть меньше отношения L/l. Иногда число шагов достигает 12—14, и оно тем больше, чем меньше допустимое усилие экспандера. Например, при $L = 12$ м и $l = 2$ м число шагов не может быть меньше шести—восьми, а при $l = 1$ м оно равно 12—14. Увеличение длины l экспандера требует повышения усилий, прилагаемых к сегментам.

Методом построения кинематически допустимых полей скоростей получили формулу для расчета радиального усилия F, прикладываемого к каждому сегменту. Применяя теорию размерностей, можно показать, что расчет усилий определяется тремя безразмерными параметрами. В этом случае применима формула

$$F = \frac{2\sigma_т}{\sqrt{3}} hlf\left(\frac{h}{R}, \alpha\right),$$

где $\sigma_т$ — предел текучести материала трубы; h — толщина стенки трубы; l — длина деформируемого участка; R — радиус трубы (как правило, $h \ll R$); α — угол одного сегмента, при n сегментах $\alpha = 360/n$.

Если метод кинематически возможных полей определяет функцию вида $f\left(\frac{h}{R}, \alpha\right) = \frac{1}{\cos(0{,}5\alpha)}$, то для расчета усилия используем формулу

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_т \frac{hl}{\cos(0{,}5\alpha)}.$$

Например, при $\sigma_т = 520$ МН/м^2, $h = 12$ мм, $R = 0{,}6$ м, $l = 2$ м, $n = 12$, $\alpha = 30°$ получим усилие

$$F = \frac{2 \cdot 520}{\sqrt{3}} \frac{0{,}012 \cdot 2}{\cos 15°} =$$

$$= \frac{2 \cdot 520 \cdot 0{,}012 \cdot 2}{\sqrt{3} \cdot 0{,}966} = 14{,}9 \text{ МН}.$$

При увеличении толщины h стенки трубы до 20 мм усилие составит 24,8 МН.

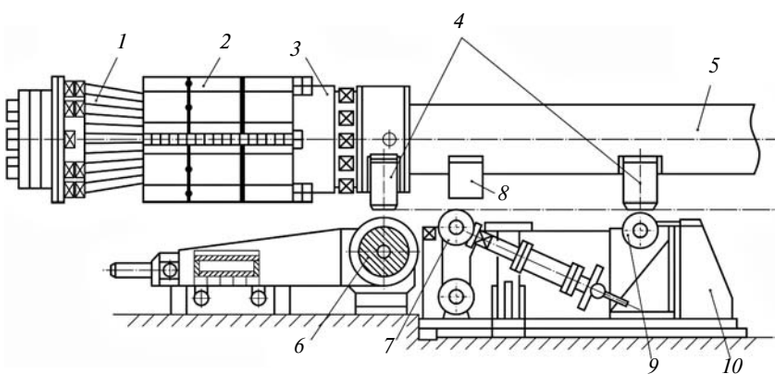


Рис. 2. Конструкция экспандера

Ve618.fm Page 34 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

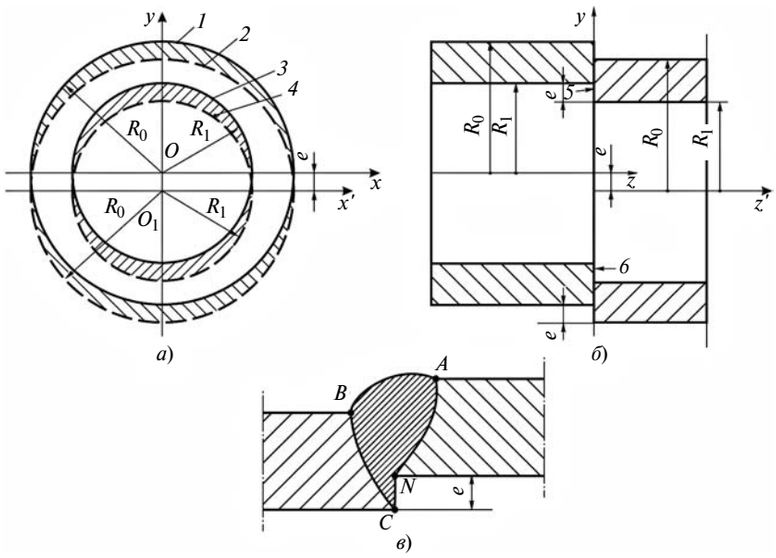


Рис. 3. Схема стыковки двух труб

Как правило, одношовные трубы изготовляют из сталей классов прочности К38 — К65 и Х42 — Х80: диаметр 1000÷1420 мм, толщина стенок до 52 мм, длина до 18 м, давление до 22 МПа. Формирование трубы осуществляли по технологии фирмы SMS Meer (ФРГ) с использованием схемы ICOE [6]. Так как трубопровод — изделие, состоящее из большого числа труб, то при их соединении неизбежно возникают определенные погрешности в виде образования ступенек на стыках. Схема стыковки труб приведена на рис. 3.

Сечения труб с наружными R_0 и внутренними R_1 радиусами показаны на рис. 3, *а*. Сечения, обозначенные линиями *1* и *3*, при смещении труб на величину *e* занимают положения, показанные штриховыми линиями *2* и *4*. При стыковке труб с плоскими торцами это приводит к образованию ступенек (показаны штриховкой). Как видно на рис. 3, *б*, ступеньки, обозначенные линиями *5* и *6*, несколько уменьшают площадь сечения и препятствуют течению жидкости или газа. Изменяется и напряженное состояние участка соединения труб. На рис. 3, *в* показано соединение труб наружным сварным швом.

Сечение шва ограничено линиями *AB*, *BC*, *CN* и *NA*. Если поверхности *AN* и *BC* определяются конфигурацией паза, то поверхность, условно показанная линией *CN*, точно не определяется. На рис. 3, *в* линия *CN* показана прямой, но фактически ее положение (и форма) зависит от режимов сварки и заполнения объема *ABCNA* металлом. Если на поверхности *CN* образуются выступы, углубления, включения шлака и др., то они могут стать концентраторами напряжений и причиной трещин [11—13].

Несмотря на то что положение и форма поверхности *AB* определяются также лишь приблизительно, но ее легче контролировать и устранять возможные дефекты. Поверхность *CN* контролировать труднее, так как, например, шлифованием этих участков можно удалить выступы, но не впадины и углубления, которые будут локальными концентраторами напряжений и приведут к разрушению металла. Этому также способствуют остаточные напряжения в металле после сварки.

При двусторонней сварке (наружным и внутренним швами) участок *CN* может оказаться внутри шва, тогда его дефекты могут стать причиной развития трещин. Такой опасный дефект, как непровар корня сварного шва, часто наблюдается именно в кольцевых швах трубопроводов. Такие дефекты, называемые иногда "аномальные стыки труб", создают серьезные проблемы при эксплуатации трубопроводов вследствие возникновения турбулентности в потоке жидкости или газа.

В работе [10] отмечается: "В центральном районе около половины всех аномальных стыков представляют серьезную опасность для эксплуатации газопроводов (непровары, либо смещения кромок)". Наличие плохо обтекаемого потоком препятствия (ступенек) приводит к периодическому появлению около них завихрений, которые отделяются и уносятся потоком жидкости (газа), частота появления которых возрастает с повышением скорости потока. Это создает значительные колебания давления в трубах (и напряжений в металле), что ускоряет развитие опасной стресс-коррозии. Иногда в трубах возникает шум (колебания звуковых частот).

Влияние такого дефекта, как ступенька (аномальный стык труб), если он возник при сборке и сварке трубопровода, оказывает отрицательное влияние длительное время, иногда в течение нескольких лет (устранить такой дефект невозможно). При этом не только увеличивается расход энергии на транспортировку газа или жидкости, но снижаются прочность и долговечность труб.

Например, в работе [15] указывается, что для трубопроводов, проложенных в морской воде, периодические колебания с частотой 0,10÷0,167 Гц могут в 2—3 раза ускорить коррозию и существенно снизить их долговечность (по сравнению с усталостной долговечностью в обычной атмосфере).

Ve618.fm Page 35 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Число аварий на трубопроводах все еще значительно, что приводит к большим потерям. Так, из добываемой в РФ нефти (до 305 млн т) при авариях теряется 4÷5 %, а ущерб оценивается в 270 млн долл. в год [6]. Причина этого — весьма значительное число ослабленных дефектных участков. При длине труб 18 м на каждые 1000 км трубопровода приходится более 55 500 кольцевых стыков, а разрушение даже одного из них приводит к серьезной аварии [10—15].

Отметим, что и при соединении бесшовных труб в трубопроводе кольцевыми швами неизбежно формируются ступеньки со всеми отрицательными последствиями (это относится и к трубам из неметаллических материалов). Для примера рассмотрим участок трубопровода длиной 720 км, собранный из труб длиной 18 м. Принимаем число стыков на этом участке $n = 720 \cdot 10^3/18 = 4 \cdot 10^4$. Вероятность разрушения одного стыка труб в течение года, которая определяется методами теории вероятностей [16, 17], составит $P = 10^{-5} \div 10^{-4}$.

Часто используют теорему Пуассона при небольших значениях P и больших значениях n, принимая $Pn = \lambda = \text{const}$ для определения вероятности того, что за год эксплуатации произойдет разрушение не менее двух стыков труб. При больших значениях n и небольших значениях P (в таких случаях применяют термин "вероятность редких событий") используют формулу Пуассона:

$$P(m) = \frac{\lambda^m}{m!} \exp(-\lambda),$$

где $m = 2$ — число разрушенных стыков.

Если нас интересует вероятность разрушения не менее двух стыков, то следует использовать формулу [17]

$$P(m) = 1 - P(0) - P(1) - P(2)$$

или

$$P(m) = 1 - \frac{\lambda^0}{0!} \exp(-\lambda) - \frac{\lambda}{1!} \exp(-\lambda) - \frac{\lambda^3}{2!} \exp(-\lambda). \quad (1)$$

Установлено, что оценка условий эксплуатации трубопроводов с вероятностью $P = 10^{-5} \div 10^{-4}$ весьма приближенна ввиду значительного разброса ее значений, которые сильно зависят от технологии сборки и сварки, методов контроля и дисциплины труда. Эти значения малы (10^{-5}), но неправильно принимать $P \approx 0$.

Следует иметь в виду, что даже близость вероятности к нулю не всегда означает невозможность реализации данного события. Даже очень небольшое значение P можно получить при достаточном числе опытов. Так, А. Н. Колмогоров указывал: "Из обращения вероятности в нуль следует только, что при однократной реализации δ событие A практически невозможно. Это, однако, не означает, что при достаточно длинном ряде испытаний событие A также не наступит" [16, с. 14].

Например, в нашем случае при $P = 10^{-4}$ $n = 4 \cdot 10^4$ и $\lambda = 4{,}0$ согласно формуле (1) получим вероятность разрушения не менее двух швов:

$$P(2) = 1 - \frac{4^0}{1} \exp(-4) - \frac{4}{1!} \exp(-4) - \frac{4^2}{2!} \exp(-4) = 1 - 13\exp(-4) = 0{,}76,$$

которую можно оценить, как весьма значительную.

При уменьшении параметра λ на порядок (до $\lambda = 0{,}4$) получим вероятность $P(2) = 8{,}4 \cdot 10^{-2}$, но даже при этом значении разрушение не менее двух стыков возможно (рис. 4). Видно, что быстрое увеличение функции $P(2)$ имеет место уже при $P > 0{,}2 \cdot 10^{-4}$. Причина такого изменения функции — наличие в трубопроводе большого числа стыков. Даже при очень малой вероятности разрушения отдельного стыка вероятность появления дефектов (например, трещин) в трубопроводе значительна.

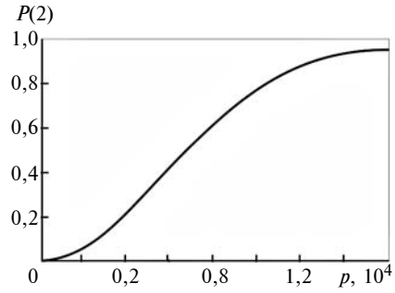


Рис. 4. Зависимость вероятности P (2) от параметра p

Обратим внимание еще на один фактор. Напряжения в любой детали, как правило, зависят от ее размеров таким образом, что опасными являются только одинаковые отклонения. Например, при растяжении цилиндрического образца и номинальных напряжениях, меньше допускаемых, опасны только отрицательные отклонения диаметра. Положительные отклонения диаметра не столь опасны, так как в этом случае повышается запас прочности. Известно, что при нормальном распределении случайной величины вероятность того, что отклонение от номинального размера превысит две величины среднего квадратичного отклонения, равна 0,046, и три указанных величины — 0,003. При расчетах на прочность обычных деталей, как правило, опасными являются только отрицательные отклонения размеров, так как при этом увеличиваются напряжения и опасность разрушения.

Что касается труб, соединенных в трубопроводы, опасными являются в равной мере смещения труб на величину e (см. рис. 3) в обе стороны. Смещение трубы на величину e в направлении оси y (см. рис. 3) или в противо-

Ve618.fm Page 36 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

положном направлении будет одинаково отрицательным [11]. В обоих случаях сечение диаметра уменьшится на величину 2*e* и ухудшатся условия нагружения труб. При таких смещениях неизбежно: 1) усилится турбулентность потока жидкости или газа, возрастет гидравлическое сопротивление, возникнут колебания давления в трубах; 2) увеличатся концентрация напряжений вблизи сварного шва и число возможных дефектов сварки.

Совершенствование технологии сборки трубопроводов

Для устранения образования ступенек предлагается технология сборки трубопроводов, основная идея которой заключается в том, что деформирование двух соединяемых труб экспандированием осуществляют не отдельно, а одновременно и одним инструментом (рис. 5) [11].

Сначала трубы *1* и *2* соединяют на участке *3*, где должен быть сварной шов (см. рис. 5, *а*), а затем вводят в обе трубы сегменты *4* и *5*, для экспандирования которых используют приводы в виде гидравлических цилиндров *6*, *7* и *8*, *9*. На рис. 5 показаны только два сегмента (возможно применение экспандеров других конструкций). Цилиндры закреплены на направляющем стержне *10*, который опирается на ролики *11* и *12*. После введения экспандера в участок соединения труб *1* и *2* перемещением сегментов *4* и *5* усилиями цилиндров *6*, *7* и *8*, *9* осуществляется деформация труб. Далее электродом *13* (или несколькими электродами) осуществляют сварку нагруженных деформированных труб *1* и *2* сварным швом *3*.

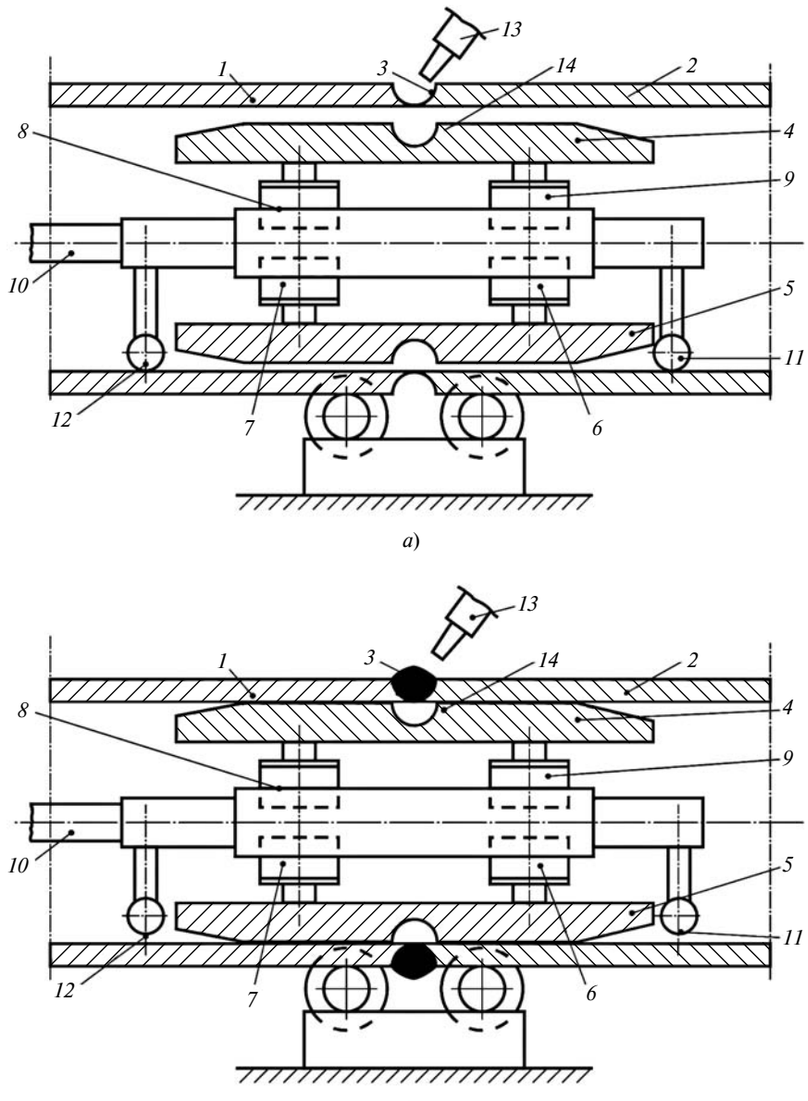


Рис. 5. Устройство для экспандирования концевых участков соединяемых труб до деформации (*а*) и после деформации и сварки (*б*)

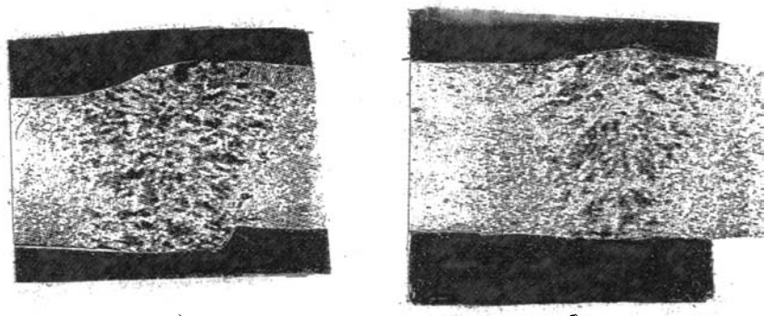
а — при обычной стыковке труб; *б* — после совместной пластической деформации соединяемых труб

В сегментах напротив сварного шва выполнен паз (например, в форме тора), поверхность которого покрыта защитными листами *14*. (На них при сварке падают брызги металла. Листы удаляют для зачистки или замены). Листы *14* состоят из отдельных сегментов, расположенных по периметру.

Неизбежные смещения труб *1* и *2* (см. рис. 5, *а*) относительно друг друга устраняются давлением на них сегментов при пластическом деформировании. Сварку труб *1* и *2* наружным швом следует проводить после нагружения их концевых участков при совместном экспандировании. В ряде случаев целесообразна только частичная сварка (прихватка) для фиксации взаимного положения труб. Затем экспандер удаляют и продолжают сварку труб.

Например, трубы ∅1220 мм можно экспандировать при их изготовлении (кроме концов труб длиной 1,2÷1,3 м), что позволит увеличить диаметр на 18 мм по всей длине трубы. Диаметр концевых участков при экспандировании можно увеличить только на 8,5÷9 мм, что и делают уже на месте сборки труб в линию трубопровода [11]. Разгрузку после совместной деформации следует осуществлять после сварки, хотя бы частичной для фиксации труб.

Ve618.fm Page 37 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM



а) *б*)

Рис. 6. Схемы соединения труб при обычной технологии (*а*) и при сварке после их совместной деформации (*б*)

Для опытов использовали образцы труб ∅300 мм и длиной 300 мм при экспандированиии. Образцы труб соединяли со смещениями, равными 0,15; 0,20 и 0,25 от их толщины, равной соответственно 7, 5 и 9 мм.

На рис. 6, *а*, *б* показаны разрезы соединения двух труб при сварке соответственно без совместной деформации и после совместной деформации, обеспечившей полное устранение ступенек.

При необходимости двусторонней сварки после совместного экспандирования и сварки наружным швом следует удалить экспандер, ввести в трубы сварочный узел и выполнить внутренний шов. Так как положение труб уже зафиксировано наружным швом, то при выполнении внутреннего шва они не сместятся. Плавный профиль сегментов позволяет предотвратить образование новых ступенек на некотором расстоянии от сварного шва. Полагаем, что и бесшовные трубы целесообразно сваривать кольцевыми швами при совместной деформации экспандированием концевых участков длиной, равной 0,8÷1,0 диаметра, с увеличением диаметра на $(1,2\div1,5)10^{-2}\,d$. Это обеспечит устранение ступенек на стыках труб.

Возможности совместного экспандирования соединения труб при сварке (или ином способе сборки) целесообразно рассмотреть также для агрегатов энергетического или химического машиностроения с целью устранения ступенек на соединяемых участках трубопроводов.

Вывод

Качество трубопровода зависит не только от качества труб, но и от качества их соединения, которое обеспечивается устранением возникающих при сборке дефектов.

Совместное экспандирование концевых участков соединяемых труб позволяет полностью устранить образующиеся на стыке ступеньки и связанные с ними дефекты, которые могут привести к сокращению срока эксплуатации трубопровода и авариям на нем.

Предлагаемая технология объединяет процессы обработки давлением, сборки и сварки концов обеих труб одним инструментом. Объединенный процесс "деформация — сборка — сварка" труб позволит существенно повысить точность и качество трубопроводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Анучкин М. П.** Прочность сварных магистральных трубопроводов. М.: Гостоптехиздат, 1963. 196 с.

2. **Бровман М. Я.** Исследования напряженного состояния цилиндрических труб с переменными механическими свойствами // Вестник машиностроения. 2011. № 8. С. 15—19.

3. **Жмойдин Г. Н.** В поисках своего пути — трубный комплекс России // Производство проката. 2002. № 7. С. 36—46.

4. **Shinkin V. N., Kolikov A. P.,** Elastoplastic Shaping of metal in an edgebending press in the manufacture of large diametr pipe // Steel in Translation. 2011. V. 41. N. 6. P. 528—531.

5. **Шинкин В. Н., Коликов А. Р. Барыков А. М.** Технологические расчеты процессов производства труб большого диаметра по технологии SMS Meer // Металлург. 2011. № 11. С. 77—81.

6. **Шинкин В. Н.** Сопротивление материалов для металлургов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. 655 с.

7. **Shinkin V. N., Kolikov A. P.** Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technolody // Metallurgist. 2012. V. 55. N. 11—12. P. 833—840.

8. **Миллер А.** Рост цен неизбежен // Газпром. Корпоративный журнал ПАО "Газпром". 2016. № 10. С. 1.

9. **Shinkin V. N., Kolikov A. P.** Simulation of the Shaping of blanks for large-diameter pipe // Steel in Translation. 2011. V. 41. N. 1. P. 61—66.

10. **Варламов Д. Н., Стеклов О. Н.** Дефекты коррозионного растрескивания в кольцевых сварных соединениях магистральных трубопроводов двух климатических регионов России // Технология машиностроения. 2012. № 7. С. 40—46.

11. **Бровман М. Я.** Усовершенствование технологии изготовления сварных трубопроводов // Машиностроитель. 2017. № 6. С. 24—30.

12. **Бровман М. Я.** Повышение качества труб больших диаметров // Производство проката. 2016. № 3. С. 15—19.

13. **Коликов А. П., Звонарев Д. Ю.** Моделирование процесса экспандирования сварных труб большого диаметра // Сталь. 2017. № 3. С. 41—43.

14. **Факторы**, влияющие на развитие дефектов стресс-коррозии на трубах магистральных газопроводов / А. Е. Быкова, И. И. Велиюлин, А. Д. Решетников, Н. И. Волгина // Технология металлов. 2015. № 2. С. 14—18.

15. **Смирнов А. Х., Стеклов О. Н., Граф Э. Ф.** Оценка эксплуатационной долговечности сварных, стальных конструкций морских нефтегазовых сооружений // Сварочное производство. 2013. № 9. С. 3—7.

16. **Колмогоров А. Н.** Основные понятия теории вероятностей. М.: Наука: 1974. 119 с.

17. **Бородин А. Н.** Элементарный курс теории вероятностей и математической статистики. Санкт-Петербург: Лань, 2004. 254 с.

Ve618.fm Page 38 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.838.1

А. Я. РЫЗВАНОВИЧ, канд. техн. наук, Д. Б. ШМУЛЕВСКИЙ (Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны), e-mail: galia712@yandex.ru

Анализ способов регулирования крутильных колебаний виброприводов шпинделя

Приведена сравнительная оценка разных конструкций, генерирующих крутильные колебания, с позиции использования в приводе шпинделя металлорежущих станков.

Ключевые слова: крутильные колебания, шпиндель, вибропривод, неравномерность хода.

The comparative estimation of different designs, generating torsional vibrations, from the position of using metal-cutting machine tools in the spindle drive is presented.

Keywords: torsional vibrations, spindle, vibration drive, velocity fluctuation.

Используя известную классификацию виброобработки [1], можно свести способы ее реализации к конструктивным и технологическим (рис. 1). Наиболее изучены осевые и радиальные вибрации, которые сравнительно просто регулируются по частоте и амплитуде с целью оптимизации.

Однако определенный интерес представляют и тангенциальные (крутильные) вибрации в направлении скорости главного движения. Разработаны различные конструкции (см. рис. 1, 2), но не решена задача определения спектра оптимальных параметров колебаний. Такие конструкции позволяют изменять амплитуду колебаний, реализуя *способ ударно-прерывистого резания* [2]. Сюда следует отнести кулачковый импульсный вариатор, для которого разработана методика проектирования на заданную неравномерность хода с сохранением ее при регулировании скорости выходного вала. Известно использование вариатора в качестве бесступенчато-регулируемой коробки скоростей станка и одновременно генератора крутильных колебаний вертикально-сверлильного станка [3]. Для вариатора параметры крутильных колебаний неизменны без замены элементов его конструкции.

На рис. 2, *а* представлена зубчатая передача для крутильных вибраций. Известно, что крутильные колебания скорости могут создавать некруглые зубчатые колеса, однако технология их изготовления имеет определенную сложность. Аналогичный эффект можно получить, используя цилиндрические зубчатые колеса, которые создают крутильные колебания скорости за счет того, что ведущее зубчатое колесо этой передачи и зацепляющееся с ним ведомое колесо, передаточное отношение которых $i = 1$, насажены на эксцентричные шейки валов с одинаковыми эксцентриситетами [4]. Вследствие эксцентричной посадки передаточное отношение вращающейся пары является переменной величиной, что приводит к крутильным колебаниям скорости виброшпинделя. В схеме на рис. 2, *а* электродвигатель *1* через промежуточную передачу *2* вращает зубчатую пару, зубчатые колеса *3* и *4* которой установлены на своих валах с одинаковыми эксцентриситетами e. Вращение передается на виброшпиндель *5*.

Для рассматриваемой зубчатой передачи с диаметром d_w начальной окружности зубчатых колес и межцентровым расстоянием a_w передачи определим максимальное межцентровое расстояние $a_{w\,\max}$, максимальное $i_{\max}$ и минимальное $i_{\min}$ передаточные отношения и коэффициент δ неравномерности хода передачи:

$$\left.\begin{aligned} a_{w\,\max} &= \sqrt{4e^2 + d_w^2}; \\ \Delta a_w &= a_{w\,\max} - d_w; \\ i_{\max} &= \frac{a_w + 2e}{a_w - 2e}; \\ i_{\min} &= \frac{a_w - 2e}{a_w + 2e}; \\ \delta &= \frac{4a_w e}{(4a_w^2 + 4e^2) i_{\text{ср}}}. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Конструкция, например, такой передачи из двух зубчатых колес диаметром $d_w = 50$ мм с модулем $m = 1$ мм, числом зубьев $z = 38$ и эксцентриситетом $e = 4$ мм обеспечивала колебание передаточного отношения в пределах $i = 0{,}72 \div 1{,}38$.

Достоинством передачи является простота конструкции и легкая встраиваемость в кинематику любого металлорежущего оборудования, однако реализуемая амплитуда колебаний, определяемая величиной эксцентриситета, ограничена уменьшением коэффициента перекрытия. Из этого условия максимальный эксцентриситет $e_{\max} \le 0{,}05 a_w$. Тогда, зная, что $i_{\text{ср}} = 1$, из соотношений (1) получим неравномерность хода $\delta_{\max} = 0{,}4$, что существенно сужает возможную область применения такой передачи.

Ve618.fm Page 39 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

На рис. 2, *б* представлена передача, в основу которой положен известный принцип: осевое перемещение одного из косозубых колес *3* и *4*, находящихся в зацеплении, приводит к их относительному повороту [5]. В результате передаточное отношение такого привода является переменной величиной, а угловую скорость виброшпинделя *5* можно представить в виде:

$$\omega = \omega_{ср} + \omega_{\delta}, \qquad (2)$$

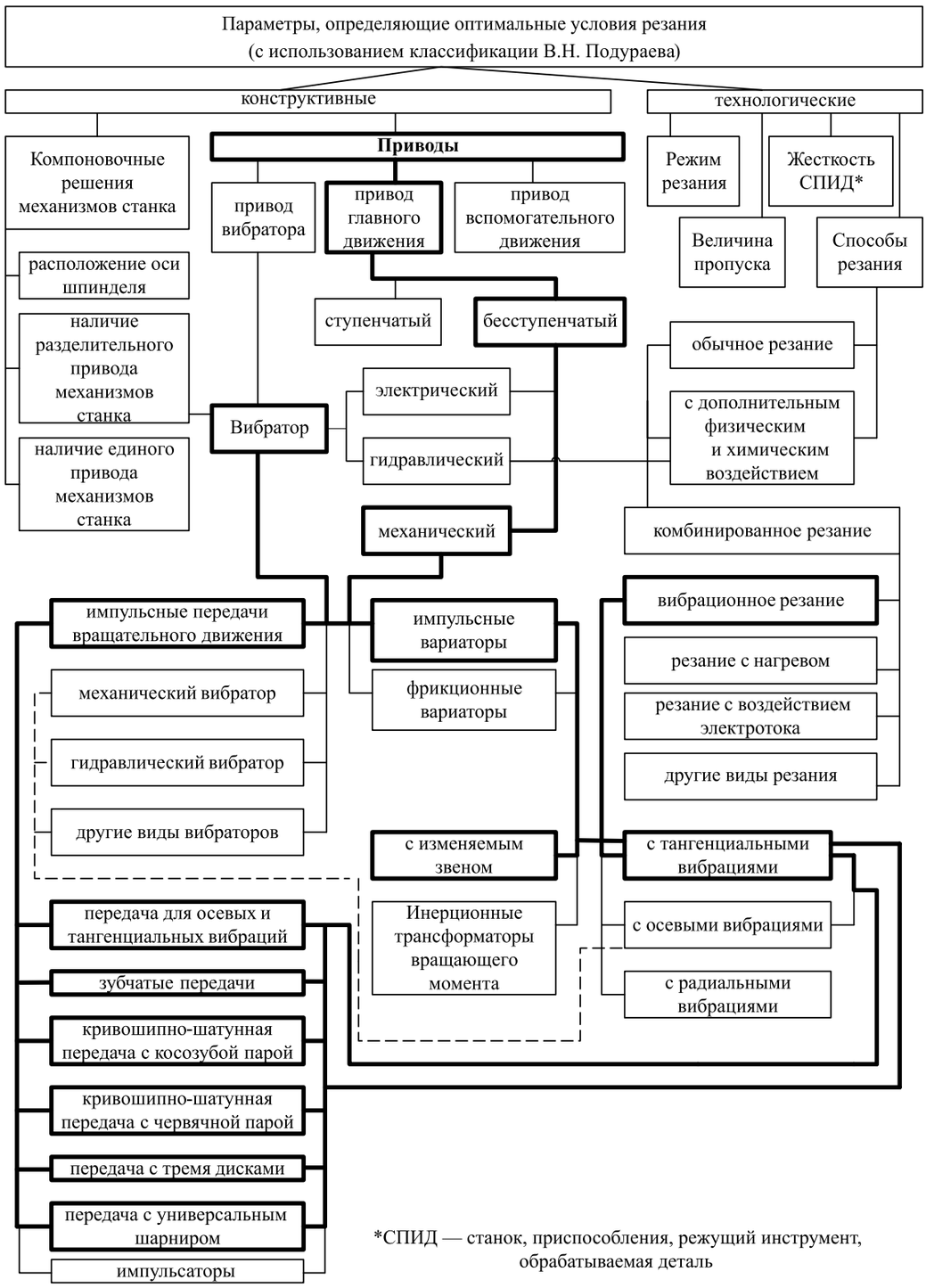


Рис. 1. Классификация способов виброобработки и конструкций для их реализации (утолщенной линией обозначено разрабатываемое направление)

Ve618.fm Page 40 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

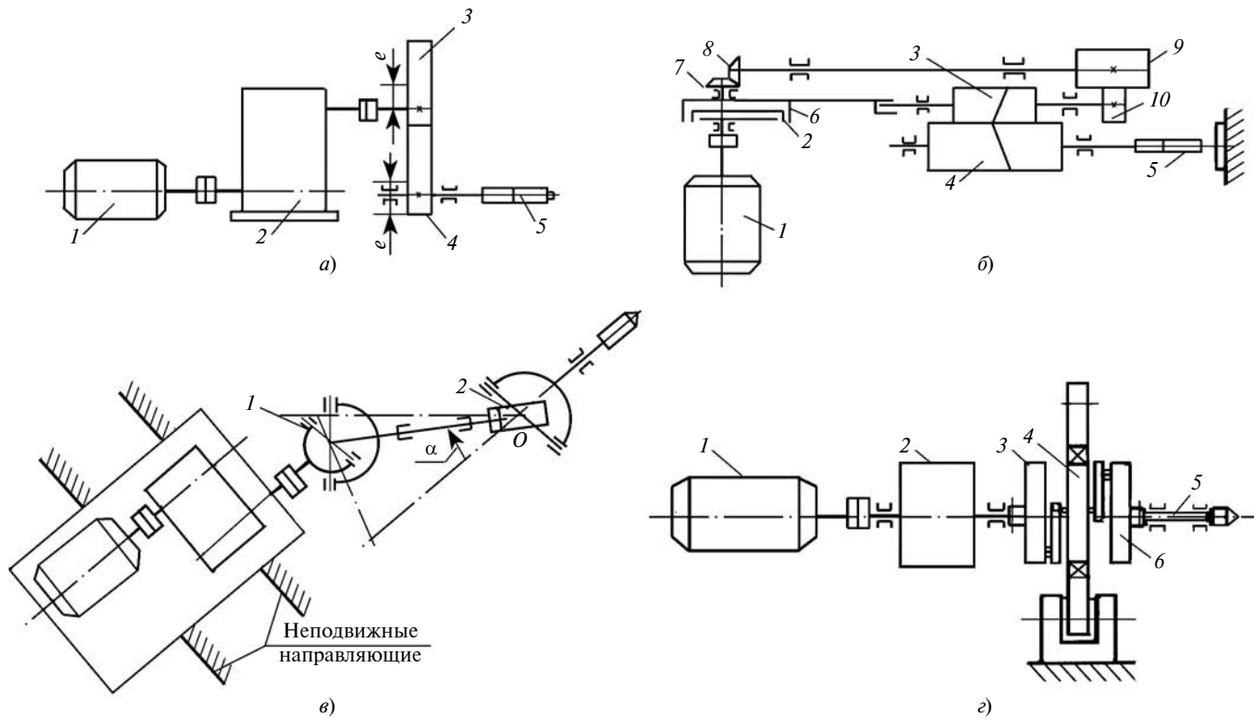


Рис. 2. Схемы импульсных передач для тангенциальных вибраций

где $\omega_{ср} = \frac{z_8}{z_7}\frac{z_{10}}{z_9}\frac{z_4}{z_3}\omega_{эл}$ (z_3, z_4, $z_7 \div z_{10}$ — числа зубьев соответствующих зубчатых колес, $\omega_{эл}$ — угловая скорость электродвигателя *1*; ω_δ — мгновенная скорость относительного поворота пары *3—4*, являющаяся функцией величины кривошипа и его угловой скорости.

Мгновенное угловое перемещение шестерни *3*, являющееся следствием осевого смещения под воздействием кривошипа *2* и шатуна *6*, определим, зная угол наклона зубьев пары *3—4* из соотношения:

$$x = [(e + b) - e\cos\alpha - b\cos\gamma]\mathrm{tg}\beta, \qquad (3)$$

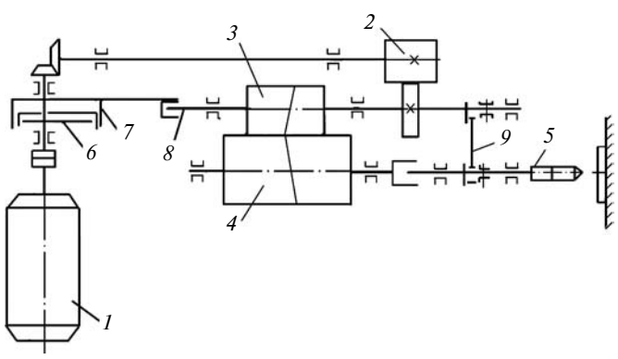


Рис. 3. Схема передач с синфазными тангенциальными и осевыми виброколебаниями шпинделя:

1 — электродвигатель; *2* — промежуточная передача; *3* и *4* — косозубые зубчатые колеса; *5* — виброшпиндель; *6* — кривошип; *7* — шатун; *8* — шлицевое соединение; *9* — тяга

где e и b — длины соответственно кривошипа *2* и шатуна *6*; α и γ — их углы наклона к оси абсцисс; β — угол наклона зубьев зубчатых колес *3* и *4*.

Дифференцируя выражение (3) по времени и приняв во внимание, что $\alpha = \omega_{эл}t$ и $\gamma = f(t)$, имеем:

$$\omega_\delta = (\dot{e}\,\alpha\sin\alpha - \dot{b}\,\gamma\sin\gamma)\mathrm{tg}\beta. \qquad (4)$$

Так как взаимное положение эксцентричной шейки кривошипа *2* и надетой на нее эксцентричной втулки, определяемое шлицами, не изменяется (см. рис. 2, *б*), то и амплитуда колебаний шестерни *3* и, следовательно, виброшпинделя *5*, остается неизменной. Если вывести эксцентричную втулку из зацепления и переместить на один зуб, например по часовой стрелке, то амплитуда колебаний шпинделя увеличится, в противоположном случае — уменьшится.

Аналогично работает шпиндельный узел с использованием червячной пары вместо пары зубчатых колес *3* и *4*. Червяк кроме вращения получает возвратно-поступательные перемещения, которые, накладываясь на постоянную угловую скорость, генерируют крутильные колебания. Регулирование амплитуды происходит по схеме, аналогичной описанной выше.

Определенный интерес представляет импульсная передача, позволяющая одновременно и синфазно сообщать шпинделю как крутильные колебания скорости, так и возвратно-поступательные

Ve618.fm Page 41 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

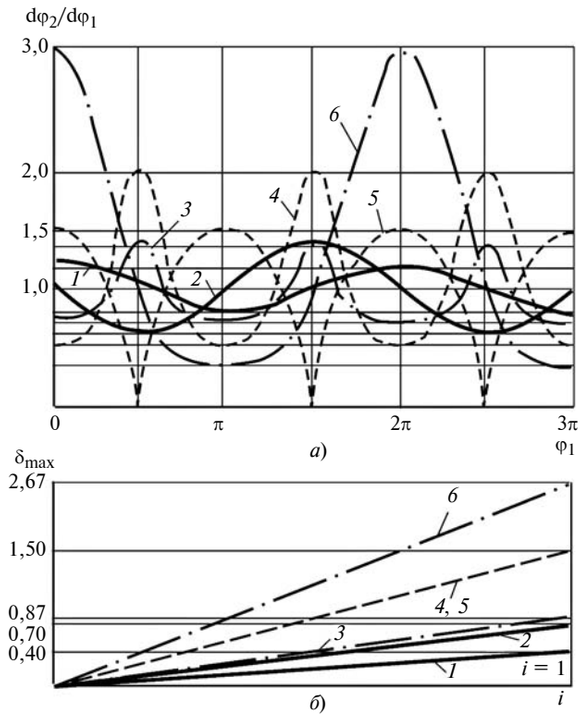


Рис. 4. Изменение скорости ($d\varphi_2$) ведомого вала в функции скорости ($d\varphi_1$) ведущего вала (*а*) и реализуемая ими максимальная неравномерность δ_{max} хода (*б*):

1 — зубчатая передача (см. рис. 2, *а*); *2* — передача с косозубой парой *3—4* (см. рис. 2, *б*); *3* — передача с универсальным шарниром [7]; *4* — передача с универсальными шарнирами *1* и *2* (см. рис. 2, *в*); *5* — импульсный вариатор (см. рис. 3); *6* — трехдисковая передача (см. рис. 2, *г*) с ведущим *3*, промежуточным *4* и ведомым *6* дисками

перемещения (осевые вибрации по классификации). Такая передача представлена на рис. 3 [6].

Все описанные передачи представляют практический интерес, позволяя регулировать и амплитуду и частоту осевых и синфазных крутильных колебаний, исследовать совместное воздействие крутильных и осевых колебаний на технологические процессы обработки, используя различные компоновочные решения.

Воспользовавшись соотношением (4) и имея в виду, что

$$v_{\delta\,max} = -v_{\delta\,min} = \omega_{эл}\, e\mathrm{tg}\beta, \quad v_{\delta ср} = 0,$$

$$\omega_{ср} = \frac{\omega_{эл}}{i_п} + \frac{v_{\delta\,ср}}{r_k},$$

где v_δ — линейная скорость косозубой шестерни *3* (см. рис. 3), $r_k = \dfrac{m_п z}{\cos\beta}$, получаем:

$$i_{max} = \left(1 + \frac{\delta}{2}\right) i_п; \quad i_{min} = \left(1 - \frac{\delta}{2}\right) i_п; \quad \delta = \frac{2ei_п}{m_п z}\sin\beta.$$

Конструктивным условием механизма двойного эксцентрика обусловлено, что эксцентриситет $e_{max} \le 20$ мм, а условием нарезания косозубых зубчатых колес угол наклона зубьев тоже ограничен: $\beta_{max} \le 60°$.

Возьмем передаточное отношение передачи $i_п = 1$, а ее модуль $m_п = 1$ мм.

Тогда максимальная неравномерность хода, реализуемая этой передачей, составит $\delta_{max} = 0{,}886$.

На рис. 2, *в* представлен вибропривод шпинделя с универсальными шарнирами *1* и *2* [3], на рис. 2, *г* — передача с тремя дисками *3*, *4* и *6* [8] (поз. *1*, *2*, *5* соответствуют позициям на рис. 2, *а*). Одна из модификаций этой передачи испытана в качестве вибропривода шпинделя вертикально-сверлильного станка и на ее основе разработан ряд перспективных виброприводов. Эти передачи представлены в классификационной схеме (см. рис. 1).

Наглядное сравнение возможностей каждой из предложенных передач (см. рис. 2, 3) и их модификаций представлено на рис. 4, *а*. Все эти передачи позволяют создавать тангенциальные колебания скорости вибропривода, осуществлять регулирование амплитуды колебаний, не изменяя среднее значение его скорости. Эти передачи позволяют получить заданные значения коэффициента неравномерности хода в определенных пределах (рис. 4, *б*). Анализ конструкций показал, что в этом отношении предпочтителен трехдисковый вибропривод.

В заключение подчеркнем, что в основу разработанных виброприводов заложены надежные и долговечные узлы широко распространенных в машиностроении механических передач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Подураев В. Н.** Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. 350 с.

2. **А. с. 878412 СССР:** МКИ[3] B23B 1/00. Способ ударно-прерывистого резания.

3. **Рызванович А. Я., Капралов В. В., Генералов В. А.** Вибрационная обработка с крутильными колебаниями шпинделя // Вестник машиностроения. 2016. № 6. С. 31—35.

4. **А. с. 631268 СССР:** МКИ[2] B23B 47/02. Привод шпинделя для вибрационного резания.

5. **А. с. 602311 СССР:** МКИ[2] B23B 47/04. Привод шпинделя.

6. **А. с. 666001 СССР:** МКИ[2] B23B 47/00. Привод шпинделя.

7. **А. с. 545421 СССР:** МКИ[2] B23B 47/04. Привод шпинделя для вибрационного резания.

8. **А. с. 655481 СССР:** МКИ[2] B23B 47/04. Привод шпинделя для вибрационного резания.

Ve618.fm Page 42 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 629.114.2-235

Ю. И. КРЫХТИН, В. И. КАРЛОВ, кандидаты технических наук
(Волгоградский ГТУ), e-mail: au@vstu.ru

Физические основы разработки заготовок дисков трения с бронзовым покрытием для трансмиссий транспортных машин[1]

Рассматривается разработка заготовок дисков трения с бронзовым газотермическим покрытием, полученным по технологии плазменного напыления, для узлов трансмиссий транспортных машин.

Ключевые слова: заготовка, диск трения, трансмиссия, газотермическое покрытие, трение в масле, бронза.

The development of friction disc billets with a bronze gas-thermal coating, obtained using plasma spraying technology, for the transmission units of transport vehicles is considered.

Keywords: billet, friction disc, transmission, gas-thermal coating, friction in oil, bronze.

Новизной предлагаемого технического решения является разработка заготовок дисков трения с бронзовым на основе БрАЖ(SiC) покрытием, полученным по технологии плазменного напыления, предназначенных для безударного включения ведущих и ведомых элементов трансмиссий гусеничных или колесных машин. При работе в масле в механизме передач и поворота гусеничной машины массой до 18 т [1] диски имели большую долговечность по сравнению с серийными металлокерамическими дисками из материала МК-5, работающими по стальному контртелу, и улучшенные эксплуатационные и технологические характеристики.

Работа выполнена совместно Волгоградским тракторным заводом и Институтом проблем материаловедения АН Украины (ИПМ). Подбор фрикционного материала и его напыление на основу (подложку) проводили в ИПМ [2].

При быстром повышении скоростей и нагрузок, с которыми работают современные машины и механизмы, из существующих материалов (стали, чугуны, бронзы, асбокаучуковые и спеченные материалы — металлокерамика, и др.) по ресурсу, надежности, износостойкости и стабильности предпочтение отдается спеченным фрикционным материалам.

Для получения фрикционных материалов шихта, состоящая из порошков меди, олова, свинца, графита и диоксида кремния, при прессовании и спекании под давлением наносится тонким слоем на поверхность каркаса из листовой стали. Этот трудоемкий метод обеспечивает сочетание прочности несущего каркаса с высокими коэффициентом трения и износостойкостью, отсутствие схватывания, плавность торможения. Такие материалы на медной основе широко применяют в узлах трения, работающих без смазывания (муфты сцепления, тормоза, электромагнитные муфты и т. п.) или с принудительным смазыванием (фрикционные электромагнитные муфты, синхронизаторы, диски трения гидротрансмиссий и т. п.), тракторов, автомобилей, транспортных гусеничных машин, металлорежущих станков и др.

Заслуживает внимания плазменный способ получения фрикционных покрытий на деталях тормозов и фрикционных устройств (муфт, вариаторов и т. д.), позволяющий одновременно выполнять технологические операции формирования и спекания наносимых частиц.

Оптимальный коэффициент трения фрикционного сопряжения, работающего в жидкой смазочной среде, $f = 0{,}08 \div 0{,}12$, без смазывания — $f \le 0{,}4$, так как при его увеличении повышается износ рабочих поверхностей тормозов и фрикционных узлов трансмиссии.

В настоящей работе рассматривается создание эффективного пористого газотермического фрикционного покрытия на бронзовой основе.

Требования, предъявляемые к покрытию, при конструировании синхронизирующих, передаточных и тормозных узлов, а также к разработке технологии его изготовления, определяют конструкцию, состав материала и структуру композиции.

Рабочая поверхность новых дисков трения представляет собой развитую поверхность, полученную в результате фрезерования радиальных пазов глубиной 0,2÷0,3 мм, которые составляют 40÷70 % поверхности дисков. Только после механической обработки, включающей абразивно-струйную обработку, фрикционное покрытие наносится непосредственно на деталь или на промежуточный (грунтовочный) слой из алюминида никеля (15 % Al, 85 % Ni) толщиной 80÷120 мкм. Основной слой толщиной 0,2÷0,45 мм из алюминиево-железистой бронзы наносится на промежуточный слой (молибденовый), нанесенный на ос-

[1] Работа выполнена с использованием программного обеспечения КОМПАС 3D и PTC Mathcad, приобретенного в рамках реализации инфраструктурного проекта по конкурсу Минобрнауки РФ "Новые кадры ОПК" 2014 г.

Ve618.fm Page 43 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

нову диска. Следовательно, рабочую часть синхронизирующих и тормозных деталей можно охарактеризовать как композиционный фрикционный слой, полученный плазменным напылением, в котором предусматривается плавное изменение состава покрытия при переходе от одного напыляемого материала к другому.

Состав материала (Cu + 10 % Al + 5 % Fe + 10 % SiC) определяют путем материаловедческих исследований и триботехнических испытаний. Материал должен эффективно сочетать прочность, износостойкость, упругость и фрикционность несущей матрицы на медной основе со свойствами абразивного наполнителя SiC, который вводят для обеспечения необходимого коэффициента трения и стабильно минимальных потерь на трение в условиях тяжелого нагружения, ограниченного смазывания и высоких температур.

Такая структура плазменного фрикционного слоя из алюминиево-железистой бронзы отвечает идее высокой эксплуатационной работоспособности, которая реализуется разделением функционального назначения на упругопластическую (однофазная структура твердого раствора алюминия в меди, Al ≤ 9,4 %) и упрочняющую (за счет вторичной фазы Al_4Si, Fe_3AlC_x, $CuAl_2$, SiC) составляющие, из которых первая отвечает за несущую способность, а вторая — за фрикционную эффективность. Заданная фрикционность обеспечивается формированием на рабочей поверхности тонкой подвижной экранирующей пленки, предохраняющей сопряженные поверхности от схватывания и определяющей сопротивление скольжению коэффициентом трения $f = 0{,}1 \div 0{,}12$.

На рис. 1 приведена микроструктура покрытия из бронзы БрАЖ(SiC).

Ренгеноструктурное исследование показало, что введение 10 % Al в медную основу приводит к частичному образованию

Рис. 1. Микроструктура покрытия из бронзы БрАЖ(SiC); подложка сталь Ст.3

двухфазной структуры — α-твердого раствора с включениями эвтектики, содержащей γ-фазу. Растворимость железа в меди не превышает 0,4÷0,5 %, поэтому почти все количество железа остается в виде нерастворимых включений.

В качестве промежуточных слоев использовали плакированные порошки, состоящие из 85 % Ni и 15 % Al. При напылении этих слоев толщиной 80÷120 мкм под действием высокотемпературной газовой струи происходят экзотермические реакции компонентов порошка с образованием их интерметаллического соединения — алюминида никеля. Выделяющаяся при реакциях теплота повышает прочность сцепления покрытия с основным металлом. Покрытие с алюминидом никеля можно успешно использовать при температурах до 650 °С благодаря высокой прочности и способности к сцеплению.

Отметим такую особенность плазменного напыления, как возможность управления составом, структурой и свойствами покрытий за счет применения порошков плакированного и конгломератного строения, т. е. возможность получения порошков нужного состава. Кроме того, при плазменном напылении целесообразнее использовать материалы в виде проволок, лент и т. п. Поэтому в данной работе при разработке технологии в качестве напыляемого материала использовали спеченную прокатную ленту из алюминиево-железистой бронзы.

К порошковой ленте для напыления предъявляется такое важное требование, как однородность размеров зерен (однородность грануляции): слишком крупные частицы не прогреваются до необходимой температуры, мелкие — испаряются, сгорают, уносятся струей газа при ударе о поверхность. Размер частиц для порошковой ленты выбирают исходя из теплофизических свойств порошков и характеристик плазмотронов. Использовали порошки с размером частиц 80÷160 мкм.

Температура плазменной струи достигает 15 000÷30 000 °С, а температура поверхности при плазменном напылении покрытий достигает 150÷200 °С. Поэтому плазменный метод рационально использовать для напыления бронзы, молибдена и ряда других материалов на детали узлов трения, изготовленные из недорогих конструкционных сталей, с целью обеспечения их хороших эксплуатационных характеристик.

Материалы на основе бронзы отличаются повышенной фрикционностью. Апробация материалов, изготовленных плазменным напылением с механическим активированием (кратковременное приложение давления после напыления) поверхности, позволяющим снижать пористость покрытия до 7 %, показала, что во фрикционных парах рационально использовать алюминиево-железистую бронзу БрАЖ(SiC). Небольшое изнашивание предлагаемых материалов предопределяет увеличение их ресурса при работе в реальной фрикционной паре, а высокие коэффициенты трения — требуемую фрикционную эффективность.

Ve618.fm Page 44 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

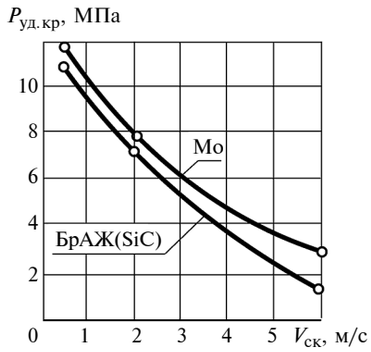


Рис. 2. Зависимости нагрузки $P_{уд.кр}$ от скорости $V_{ск}$ для фрикционных плазменных покрытий Mo (*1*) и БрАЖ(SiC) (*2*)

Пара трения "плазменное покрытие на основе БрАЖ(SiC) — сталь 65Г" была испытана в лабораторных условиях на машине трения МТ-22 при работе с трансмиссионным маслом МТ-16П (ГОСТ 6337—83). Результаты испытаний в виде зависимости приложенной к паре трения удельной критической (максимально возможной) нагрузки $P_{уд.кр}$ (давление) от скорости скольжения $V_{ск}$ для фрикционных плазменных покрытий Mo и БрАЖ(SiC) приведены на рис. 2 [3]. Установлено (при непрерывном трении на машине трения), что плазменные бронзовые покрытия выдерживают достаточно высокие удельные критические нагрузки $P_{уд.кр}$, что объясняется их пористостью и определенной износостойкостью покрытия.

Плазменное покрытие из БрАЖ(SiC) представляет собой пористое тело и при его нагружении трением трудно достичь значения $P_{уд.кр}$ (см. рис. 2), так как возможно уплотнение материала на локальных участках поверхности трения.

Критические нагрузки $P_{уд.кр}$ характеризуют полное или частичное разрушение масляной пленки, что приводит к трению без смазывания и увеличению коэффициента f трения до значений, характерных для сухого трения. При достижении значения $P_{уд.кр}$ для бронзового плазменного покрытия при работе в масле коэффициент трения $f \geq 0{,}2$. Триботехнические характеристики пар трения, работающих в масле, полученные на машине трения МТ-22, приведены на рис. 3, *а*, *б*.

Работа фрикционного сопряжения "сталь 65Г — сталь 65Г" в масле характеризуется высокими изнашиванием (10÷13 мкм/км) и коэффициентом трения. При этом при скоростях скольжения от 0,5 до 3 м/с наблюдается тенденция к смещению в область низких величин изнашивания и коэффициента трения.

При замене одной из сталей в паре трения "сталь 65Г — сталь 65Г" на пористое бронзовое покрытие БрАЖ(SiC) фрикционная эффективность не ухудшилась, но при этом замедлилось изнашивание контактирующих поверхностей. Испытания покрытия БрАЖ(SiC) по стали 65Г характеризуются износом, равным 3÷4 мкм/км.

На машине трения МТ-22 провели также испытания покрытия из БрАЖ(SiC) при ограниченной подаче смазки МТ-16П и скорости скольжения $V_{ск} = 13$ м/с. Получили следующие результаты:

Нагрузка $P_{уд.}$, МПа	0,5	1,0	1,5
Коэффициент трения	0,216	0,22	0,21

В условиях граничной смазки коэффициент трения значительно зависит от толщины смазочного слоя. В ряде классических работ по исследованию фрикционных материалов в условиях жидкой смазочной среды указывается коэффициент трения $f = 0{,}05$—$0{,}15$.

На рис. 4 показан разработанный фрикционный диск с плазменным покрытием.

К заготовкам фрикционных дисков с бронзовым покрытием предъявляются следующие технические требования:

покрытия представляют собой механическую смесь порошков бронзы БрАЖ9-4 (ТУ 48-21-642—79) и карбида кремния SiC (ГОСТ 26327—84), которая наносится на основу из стали 65Г (ГОСТ 1050—74);

форма и размеры заготовок соответствуют рис. 4;

твердость покрытий по Виккерсу не менее 1200÷1500 МПа;

адгезионная прочность покрытий не менее 22 МПа;

пористость покрытий 15÷20 %;

микроструктура покрытия: матрица (твердый раствор Al и Fe в Cu) традиционного бронзового цвета, на отдельных участках которой включения интерметаллидов $Cu_xAl_yFe_z$ светлосерого с голубизной оттенка;

триботехнические характеристики покрытия в паре со сталью 65Г при испытании со смазкой ТСЗП-8 (ОСТ 38.01365—84), $V_{ск} = 10$ м/с и $p_{уд} = 4$ МПа: $f \geq 0{,}15$; износ не более 4 мкм/км;

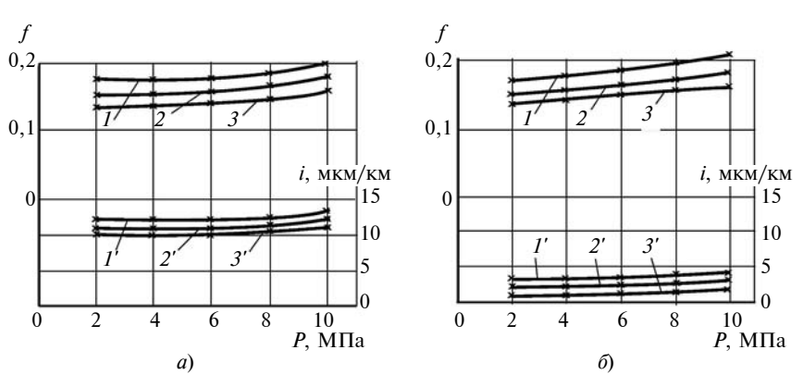


Рис. 3. Фрикционные характеристики сопряжений "сталь 65Г — сталь 65Г" (*а*) и "БрАЖ(SiC) — сталь 65Г" (*б*) при скорости $V_{ск}$ = 0,5 (кривые *1* и *1′*), 1,5 (кривые *2* и *2′*) и 3 м/с (кривые *3* и *3′*) при ограниченной подаче смазки

Ve618.fm Page 45 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

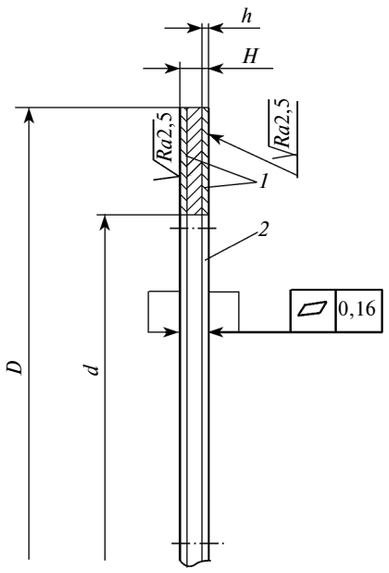


Рис. 4. Фрикционный диск с плазменным покрытием:

1 — основа диска (D = 216 ± 1 мм, d = = 168 ± 0,5 мм, $H = 3_{-0,075}$ мм, $h = 0{,}25^{+0,06}$ мм); *2* — фрикционный материал (D = 176 ± 0,1 мм, $d = 133^{+1,0}$ мм, $H = 3{,}3_{-0,075}$ мм, $h = 0{,}25^{+0,06}$ мм)

при многократном повторении циклов включение/выключение фрикционные диски должны хорошо противостоять резкому повышению температуры (тепловому удару);

покрытие на заготовке не должно иметь трещин, сколов, отслоений от поверхности основы, видимых невооруженным глазом.

На рис. 5 показаны технологические образцы для определения свойств покрытия.

Заготовки дисков трения испытывают по следующей методике.

1. Перед испытаниями размеры заготовок контролируют штангенциркулем.

2. Для определения твердости на два цилиндрических образца ∅30 ± 1 мм и толщиной 10^{+1} мм с шероховатостью поверхности Ra = 2,5 мкм на плазменной установке УПУ-3 наносят покрытие толщиной 1,3 ± 0,1 мм по режиму напыления покрытия на заготовки дисков трения. На плоскошлифовальном станке покрытие шлифуют до получения металлического блеска и шероховатости не более 160 мкм. На полировальном станке покрытие полируют до исчезновения рисок, видимых невооруженным глазом. После шлифования и полирования толщина покрытия должна быть не менее 1,0 ± 0,1 мм.

На каждом образце проводят пять измерений, равномерно распределенных по образцу. Твердость покрытия определяют по минимальному значению из десяти измерений.

3. Адгезионную прочность определяют по ГОСТ 1497—84 на универсальной разрывной машине МР-0,5-1 (ГОСТ 7855—84) на десяти образцах (штырях) (см. рис. 5, *а*). Штырь *2* вставляют в обойму *1* и стопорят винтом *3*. Далее поверхность *A* каждого штыря обезжиривают спиртом и обрабатывают струей дроби. Образец охлаждают до нормальной температуры, отпускают стопорный винт, штырь извлекают из обоймы и снимают заусенцы, образовавшиеся при дробеструйной обработке. Затем образец собирают в последовательности, обратной разборке. На подготовленные поверхности *A* образцов наносят покрытие толщиной 1,2 ± 0,1 мм по режиму напыления заготовок дисков.

Адгезионную прочность покрытия определяют как среднее арифметическое десяти измерений по формуле $A = P_к/S_к$, Па, где $P_к$ и $S_к$ — соответственно усилие, Н, и площадь образца, м^2, в момент отрыва фрикционного материала от подложки. Для штыря *2* диаметром 5 мм (см. рис. 5, *а*) $S_к = 19{,}63 \cdot 10^{-6}$, м^2.

4. Для определения микроструктуры образцы ∅30 ± 1 мм и толщиной 10^{+1} мм с шероховатостью цилиндрической поверхности Ra = 2,5 мкм после подготовки, напыления, определения твердости шлифуют на плоскошлифовальном станке, чтобы плоскость шлифа была перпендикулярна плоскости напыления, и полируют алмазной пастой до получения зеркально гладкой поверхности.

После приготовления и сушки шлифа с помощью микроскопа при увеличении ×400 определяют микроструктуру покрытия.

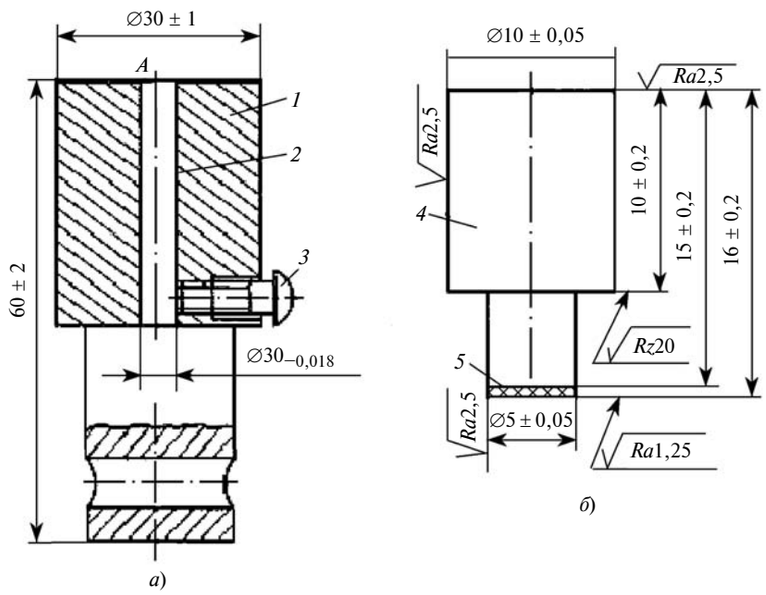


Рис. 5. Технологические образцы для определения адгезионных (*а*) и триботехнических (*б*) свойств покрытий:

1 — обойма; *2* — штырь; *3* — винт; *4* — основа образца из стали 65Г; *5* — фрикционный материал

Ve618.fm Page 46 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

5. При определении пористости для подготовки образцов используют медный цилиндрический стержень ∅35 ± 5 мм. Дробеструйную обработку цилиндрической поверхности стержня проводят так, чтобы площадь шероховатой поверхности составляла 30÷40 % от общей площади, что определяется визуально. Бронзовое покрытие толщиной 1,0 ± 0,1 мм и шириной 20 ± 5 мм наносят на стержень по режиму напыления покрытия на основу заготовки фрикционного диска. Затем напыленный слой разрубают вдоль оси стержня. Полученное в виде браслета покрытие легко снимают со стержня и распиливают или разламывают на пять частей произвольной формы.

Пористость определяют гидростатическим методом по ГОСТ 18898—73 как среднее арифметическое значение, полученное при испытании пяти образцов.

6. Триботехнические характеристики определяют на машине трения МТ-68 в паре с контртелом из стали 65Г (ГОСТ 1050—74) на пяти образцах (рис. 5, *б*), предназначенных для испытаний на трение и изнашивание. Покрытие толщиной 1 ± 0,1 мм наносят по режиму напыления на основу заготовки дисков. Испытания проводят по ГОСТ 26614—85 со смазкой ТСЗП-8 при скорости скольжения 10 м/с и удельном давлении 4 МПа. Коэффициент трения и темп изнашивания покрытия определяют как среднее арифметическое значение при испытании пяти образцов. Разработанный диск трения с плазменным фрикционным бронзовым покрытием показан на рис. 6.

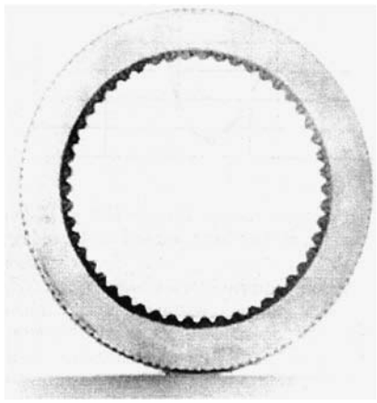


Рис. 6. Разработанный диск ∅176 мм трения с плазменным фрикционным бронзовым покрытием толщиной 3,3 мм

Условия работы дисков трения в механизме передач и поворота гусеничных машин массой 13,2÷18 т приведены в таблице. Четыре диска трения (для включения зубчатых муфт реверса и первой передачи) с плазменным напылением на основе БрАЖ(SiC) устанавливали в тормоз-синхронизатор механизма передач и поворота гидромеханической трансмиссии с зубчато-фрикционным переключением передач транспортной гусеничной машины массой 18 т, которые эксплуатировались без замечаний при пробеге 1500 км.

Условия работы дисков трения в механизме передач и поворота

Показатель	Диск ∅176 мм	Диск ∅216 мм
Удельная работа трения за одно включение муфты $A_{уд.тр}$, кДж/м^2	29/465	1171÷290
Скорость скольжения диска на максимальном радиусе $V_{ск}$, м/с	7,17/27	7,06÷8,61
Рабочее удельное давление на поверхности трения q, МПа	3,3/2,87	3,6÷3,1
Время буксования при включении фрикционной муфты $\tau_{букс}$, с	0,03/0,2	1,17÷0,31
Средняя температура в зоне трения за одно буксование диска t, °С	106/144	192÷171
Допустимая температура в зоне трения, °С:		
средняя [$t_{ср}$] при длительной работе диска	500	
максимальная (кратковременная) [t_{max}]	800	
Диапазон допустимых рабочих температур [Δt], °С	−60÷+800	
Материал контртела	Сталь 65Г, 285÷321 *HB*, *Ra* = 1,25 мкм	
Трение	В масле ТСЗП-8	

Примечания. 1. Диск ∅176 мм: в числителе приведены данные для тормоза-синхронизатора, в знаменателе — для муфты водометного движителя. 2. Диск ∅216 мм для механизма передач и поворота на второй — пятой передачах.

Вывод

Разработанные диски трения с пористым покрытием на основе бронзы БрАЖ(SiC) в паре со стальным контртелом и при смазывании подтвердили высокие эксплуатационные и технологические качества при работе фрикционного узла гидромеханической трансмиссии гусеничной машины массой 18 т. Целесообразно продолжить работу по их применению и испытанию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Трансмиссии** гусеничных и колесных машин / В. М. Труханов, В. Ф. Зубков, Ю. И. Крыхтин, В. Ф. Желтобрюхов М.: Машиностроение, 2001. 736 с.

2. **Федорченко И. М., Францевич И. Н., Радомысельский И. Д.** Порошковая металлургия, материалы, технологии, свойства, области применения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 623 с.

3. **Крыхтин Ю. И., Карлов В. И.** Физические основы разработки заготовок дисков трения с молибденовым покрытием для повышения надежности работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 70—74.

Ve618.fm Page 47 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.9.06

Б. М. БАЗРОВ, д-р техн. наук (ФГБУН ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН), e-mail: modul_lab@mail.ru

Технологичность конструкции изделия и ее оценка

Рассмотрено и уточнено понятие технологичность. Проанализирован метод оценки технологичности конструкции изделия (КИ). Определены свойства КИ и их связи с показателями КИ. Приведены варианты определения технологичности КИ.

Ключевые слова: технологичность, изделие, конструкция, деталь, свойство, показатель, коэффициент, трудоемкость.

The concept of manufacturability is considered and clarified. The evaluation method of the manufacturability of the product design (PC) is analyzed. The properties of the product design and their relationship with their indices are determined. The variants of determination of manufacturability of the product design are given.

Keywords: manufacturability, product, structure, part, property, index, coefficient, labor intensity.

Технологичность конструкции изделия (ТКИ) во многом определяет трудоемкость и стоимость его изготовления, эксплуатационную эффективность, а также простоту и стоимость утилизации. Поэтому отработка конструкции изделия (КИ) на технологичность должна осуществляться уже на этапе его разработки.

Отработка КИ на технологичность направлена на совершенствование изделия при обеспечении заданных базовых показателей — трудоемкости, себестоимости и пр.

Оценка КИ на технологичность предполагает установление показателей КИ, влияющих на базовые показатели.

Согласно ГОСТ 14205—83 [1] под ТКИ понимается "совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ".

Однако к данному определению ТКИ есть ряд замечаний.

Во-первых, в жизненном цикле изделия есть три основных этапа — изготовление, эксплуатация, утилизация, и ТКИ для каждого из них характеризуется определенными факторами, что должно отражаться в определении.

Во-вторых, технологичность понятие относительное, поскольку она зависит от применяемой технологии. Например, технологичная конструкция детали, изготовляемой в единичном производстве, будет нетехнологичной при ее массовом производстве, или нетехнологичной для этапа эксплуатации. Поэтому в определении понятия ТКИ должны найти отражение технологии, а не объем выпуска изделия.

В-третьих, ТКИ, в первую очередь, определяет возможность изготовления изделия, его технического обслуживания, ремонта, утилизации, и только потом достижение оптимальных затрат.

Поэтому предлагается следующее определение: *ТКИ — совокупность свойств конструкции изделия, определяющих возможность ее производства, технического обслуживания, ремонта, утилизации и приспособленность к достижению оптимальных затрат для заданных показателей качества, применяемой технологии и условий выполнения работ.*

Согласно методике [2] при оценке ТКИ кроме базовых показателей применяют коэффициенты: сборности ($K_{сб}$), стандартизации ($K_{ст}$), унификации ($K_{у}$), повторяемости составных частей ($K_{пов}$), типизации конструктивного исполнения ($K_{тип}$), контролепригодности ($K_{к}$), легкосъемности составных частей ($K_{д}$), доступности мест обслуживания ($K_{дос}$), точности обработки ($K_{точ}$), шероховатости ($K_{ш}$), взаимозаменяемости ($K_{в}$).

Коэффициент сборности — отношение числа E специфицируемых составных частей изделия к общему числу составных частей, к которым относятся сборочные единицы, комплексы, детали:

$$K_{сб} = \frac{E}{E + D},$$

где D — число деталей в изделии (за исключением деталей, вошедших в E).

Коэффициент стандартизации учитывает число стандартных деталей и сборочных единиц:

$$K_{ст} = \frac{E_{ст} + D_{ст}}{E + D},$$

где $E_{ст}$ — число стандартных сборочных единиц в изделии; $D_{ст}$ — число стандартных деталей, которые являются составными частями изделия и не входят в $E_{ст}$ (стандартные крепежные детали не учитываются).

Коэффициент унификации:

$$K_{у} = \frac{E_{у} + D_{у}}{E + D}.$$

Здесь $E_{у} = E_{у.з} + E_{у.п} + E_{ст}$ — число унифицированных сборочных единиц изделия; $D_{у} = D_{у.з} + D_{у.п} + D_{ст}$ — число унифицированных деталей, являющихся составными частями изделия и не вошедших в $E_{у}$ (стандартные крепежные детали не

Ve618.fm Page 48 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

учитываются), где $E_{у.з}$ и $D_{у.з}$ – заимствованные унифицированные сборочных единиц и деталей соответственно; $E_{у.п}$ и $D_{у.п}$ — покупные унифицированные сборочных единиц и деталей соответственно; $E_{ст}$ и $D_{ст}$ — стандартные сборочные единиц и деталей.

Коэффициент повторяемости составных частей:

$$K_{пов} = Q_{с.ч}/(E + D),$$

где $Q_{с.ч}$ — число наименований составных частей в изделии.

Коэффициент типизации конструктивного исполнения характеризует преемственность данного исполнения изделия относительно множества его исполнений по составу и структуре:

$$K_{тип}^{к.и} = Q_{с.к}/Q_{с.к}^{т.п},$$

где $Q_{с.к}$ — число структурных компонентов (элементов и связей между ними) в данном исполнении изделия, соответствующих компонентам типового представителя группы исполнений; $Q_{с.к}^{т.п}$ — общее число компонентов типового представителя группы однотипных исполнений изделия.

Для типового представителя группы исполнений $K_{тип}^{к.и} = 1$.

Коэффициент контролепригодности:

$$K_к = T_{о.к}/(T_{о.к} + T_{всп.к}),$$

где $T_{о.к}$ — трудоемкость изделия на основных операциях технического контроля; $T_{всп.к}$ — трудоемкость изделия на вспомогательных операциях технического контроля.

С увеличением $K_к$ в результате снижения $T_{всп.к}$ снижается трудоемкость контроля, т. е. $T_{ид}$ и $T_{ис}$.

Коэффициент $K_к$ не показывает характеристики конструкции изделия, влияющие на трудоемкость контроля, поэтому бесполезен при разработке мероприятий по повышению ТКИ.

Коэффициент легкосъемности составных частей применим для этапов эксплуатации и утилизации изделия.

Коэффициент доступности мест обслуживания применим для эксплуатации изделия.

Коэффициент точности обработки:

$$K_{точ} = 1 - \frac{1}{A_{ср}} = 1 - \frac{\Sigma n_i}{\Sigma A n_i}.$$

Здесь $A_{ср}$ — средний класс точности обработки изделия:

$$A_{ср} = \frac{\Sigma A n_i}{\Sigma n_i} = \frac{n_1 + 2n_2 + 3n_3 + ...}{n_1 + n_2 + n_3 + ...},$$

где A — класс точности обработки; n_i — число размеров соответствующего класса точности.

Коэффициент шероховатости:

$$K_ш = 1 - \frac{1}{Б_{ср}} = 1 - \frac{\Sigma n_{im}}{\Sigma Б n_{im}}.$$

Здесь $A_{ср}$ — средний класс точности обработки изделия:

$$A_{ср} = \frac{\Sigma Б n_{im}}{\Sigma n_{im}} = \frac{n_1 + 2n_2 + 3n_3 + ...}{n_1 + n_2 + n_3 + ...},$$

где Б — класс шероховатости поверхности; n_{im} — число поверхностей соответствующего класса шероховатости.

Коэффициент $K_в$ взаимозаменяемости определяется как отношение оперативной трудоемкости замены сборочных единиц или деталей объекта без учета трудоемкости пригоночных, регулировочных и селективных работ к оперативной трудоемкости сборки объекта с учетом этих работ.

Оценка ТКИ с помощью перечисленных выше коэффициентов имеет существенные недостатки.

1. Свойства КИ отражают соответствующие показатели, которые и определяют трудоемкость изготовления изделия [3], что важно при отработке КИ на технологичность.

Анализ показал, что влияние показателей КИ отражают коэффициенты $K_{ст}$, $K_у$, $K_{пов}$, $K_{тип}$, $K_{точ}$, $K_ш$, $K_в$, остальные коэффициенты технологичности напрямую отражают влияние свойства КИ на трудоемкость, минуя показатели КИ. К ним относятся коэффициенты контролепригодности, легкосъемности, ремонтопригодности, доступности, взаимозаменяемости.

2. Не учитываются все свойства и показатели КИ, которые влияют на трудоемкость, что снижает точность оценки ТКИ.

3. Зависимость КИ от применяемой технологии не позволяет определить ТКИ суммированием коэффициентов технологичности, так как их влияние на трудоемкость в разной степени зависит от технологии.

4. Введение в коэффициенты технологичности сборочных единиц, комплексов, комплектов приводит к неоднозначности в оценке ТКИ, так как одно и то же изделие можно представить разной совокупностью сборочных единиц, комплексов, комплектов.

5. Коэффициенты $K_{ст}$, $K_у$, $K_{тип}$, $K_{пов}$ отражают только составные части КИ и не учитывают разнообразие значений их показателей, оказавших влияние на трудоемкость.

Нередко для оценки ТКИ применяют комплексные коэффициенты технологичности, представляющие собой, как правило, сумму первичных коэффициентов, а следовательно, они имеют те же недостатки.

Ve618.fm Page 49 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Все это указывает на необходимость совершенствования метода оценки ТКИ.

Рассмотрим исследуемый вопрос на примере производственной технологичности. Начинать следует с установления перечня свойств КИ и связей их с показателями КИ, определяющими трудоемкость.

Свойство изделия проявляется через определенные его качества. Конструкция изделия характеризуется определенной совокупностью свойств.

Предлагается следующий перечень свойств: доступность; сборность; простота; устойчивость; обрабатываемость; контролепригодность; легкосъемность; разнообразность.

Доступность показывает возможность изготовления данного изделия при обеспечении заданного качества, т. е. можно ли изготовить деталь, собрать изделие, осуществить контроль с помощью имеющихся технологий.

Все остальные свойства КИ влияют на эффективность затрат, связанных с производством изделия.

Определим показатели КИ, которые определяют трудоемкость изготовления изделия.

Под КИ понимается совокупность связанных между собой деталей, которую можно описать числом деталей, соединений и их показателями.

Перечислим показатели КИ, которые определяют трудоемкость.

Доступность КИ определяется:

формой и размерами поверхностей детали;
расположением поверхностей каждой детали;
твердостью материала деталей;
расположением деталей в изделии;
точностью деталей и соединений.

Сборность КИ предполагает удобство сборки изделия и определяется:

размерами деталей;
расположением деталей в изделии;
видом соединения (подвижное, неподвижное);
точностью соединения.

Простота определяется:

формой поверхностей;
расположением поверхностей детали;
расположением деталей в изделии;
минимальным числом деталей;
минимальным числом поверхностей;
минимальным числом неподвижных соединений;
наименьшей точностью и др.

Устойчивость КИ определяется:

формой и размерами поверхностей детали, являющихся базами;
соотношением размеров и площадей поверхностей детали, образующих комплекты баз;
жесткостью деталей.

Например, поверхности детали, являющиеся установочными базами, должны иметь большую площадь, а поверхность направляющей базы — большую протяженность.

Обрабатываемость определяется:

геометрией детали;
показателями свойств материала.

Например, при токарной обработке ступенчатого вала отсутствие канавок для выхода резца при подрезке торцов затрудняет обработку вала, т. е. снижает его обрабатываемость.

Показатели материала определяют трудоемкость обработки, так как от них зависит режим обработки и вид получаемой стружки. Например, сливная стружка затрудняет обработку детали.

Контролепригодность определяется:

размерами и формами поверхностей детали;
расположением поверхностей на детали;
расположением деталей в изделии.

Лекгосъемность определяется расположением деталей и видом соединений. Чем больше подвижных соединений, тем легче сборка-разборка изделия.

Разнообразность определяется:

числом стандартных, унифицированных, типовых, повторяемых деталей и соединений;
числом типовых, повторяемых схем расположения поверхностей, групп поверхностей;
числом стандартных, унифицированных размерных показателей.

Все показатели КИ, определяющие трудоемкость, представлены в таблице.

Таким образом, при оценке ТКИ следует учитывать множество показателей, число элементов КИ и их характеристики.

Элементами КИ являются: детали, поверхности, соединения.

Показателями детали являются: число поверхностей, габаритные параметры, расположение поверхностей, масса, точность расположения поверхностей, жесткость, твердость материала.

Показателями поверхности являются: форма, размеры, площадь, точность, шероховатость.

Показателями соединения являются: размеры сопрягаемых поверхностей, формы сопрягаемых поверхностей, посадка, точность.

К перечисленным показателям следует отнести показатели их разнообразия: числа стандартных, унифицированных, типовых и повторяемых элементов КИ и их показатели.

Все показатели можно разделить по их влиянию на трудоемкость на две группы.

первая группа — показатели, повышение которых повышает трудоемкость изготовления изделия. К ним относятся: число элементов, показатели качества (точность размеров, шероховатость поверхностей, твердость) и показатели разнообразия (число стандартных, унифицированных, типовых,

Ve618.fm Page 50 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

повторяемых элементов). Поэтому следует расширить перечень коэффициентов технологичности ($K_{ст}$, $K_у$, $K_{тип}$, $K_{пов}$), учитывая не только элементы КИ, но и качественные показатели деталей и узлов, например схем их расположения;

вторая группа — показатели, при изменении которых трудоемкость изменяется не пропорционально (зависимость имеет экстремум), например, при очень малых размерах трудоемкость изготовления изделия велика, при увеличении размеров она снижается до определенного значения, а затем опять возрастает.

Влияние второй группы показателей КИ на трудоемкость можно определить, зная только технологию изготовления изделия.

С учетом вышеизложенного предлагается оценку ТКИ после определения возможности изготовления изделия с заданным качеством осуществлять в два этапа.

Свойство	Показатели
Доступность	Формы и размеры поверхностей Расположение поверхностей Твердость материала Расположение деталей Точность деталей и соединений
Сборность	Размеры деталей Расположение деталей Вид соединения (подвижное, неподвижное) Точность соединения
Простота	Форма поверхностей Расположение поверхностей детали Расположение деталей в изделии Минимальное число деталей Минимальное число поверхностей Минимальное число неподвижных соединений Минимальная точность
Устойчивость	Форма и размеры поверхностей, являющихся базами Соотношение размеров и площадей поверхностей, образующих комплекты баз Жесткость деталей
Обрабатываемость детали	Форма детали Показатели материала
Контролепригодность	Размеры и форма поверхности Расположение поверхности Расположение деталей в изделии
Легкосъемность	Расположение деталей в изделии Вид соединения
Разнообразность	Число стандартных, унифицированных, типовых, повторяемых деталей и соединений Число типовых, повторяемых схем расположения поверхностей, групп поверхностей Число стандартных, унифицированных размерных характеристик

На первом этапе оценивать ТКИ по показателям первой группы, определяя их коэффициенты технологичности, а на втором этапе — по остальным показателям КИ.

Для обоих этапов при оценке ТКИ при отсутствии информации о технологии изготовления нельзя определить ТКИ суммированием их значений, так как их влияние на трудоемкость зависит от применяемой технологии.

Поэтому оценку ТК следует осуществлять по отдельным коэффициентам технологичности без их суммирования.

Оценку ТКИ можно осуществлять при разных исходных данных.

Вариант 1. Известны изделие-аналог, значения базовых показателей технологичности и технология изготовления изделия.

В этом случае определяют расчетные базовые показатели, которые сравнивают с заданными значениями. Если первые оказываются хуже заданных, следует определить коэффициенты технологичности и на основании их анализа внести изменения в КИ.

Вариант 2. Известны изделие-аналог и значения базовых показателей, неизвестна технология изготовления изделия.

В этом случае оценку ТКИ следует осуществлять сопоставлением значений коэффициентов технологичности показателей первой группы изделия-аналога со значениями коэффициентов нового изделия.

Вариант 3. Отсутствует изделие-аналог, известна технология изготовления изделия.

В этом случае оценку ТКИ осуществляют с помощью коэффициентов технологичности показателей обеих групп.

Вариант 4. Неизвестны изделие-аналог и технология изготовления изделия.

Оценку ТКИ осуществляют с помощью коэффициентов технологичности показателей первой группы.

Аналогичный подход к оценке ТКИ следует рекомендовать на этапах эксплуатации и утилизации изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **ГОСТ 14205—83.** Технологичность конструкции изделий. Термины и определения.

2. **Методика** отработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения. М.: Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР, ВНИИНмаш, 1976. 56 с.

3. **Базров Б. М.** Проблема обеспечения технологичности изделия // Наукоемкие технологии. 2016. Т. 1. № 4. С. 30—34.

Ve618.fm Page 51 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 620.1

Ю. Г. КАБАЛДИН, д-р техн. наук, Д. А. ШАТАГИН, А. В. КИСЕЛЕВ, М. В. ЖЕЛОНКИН, А. А. ГОЛОВИН
(Нижегородский ГТУ им. Р. Е. Алексеева), e-mail: uru.40@mail.ru

Автономная интеллектуальная робототехническая система диагностики магистральных газо- и нефтепроводов с применением беспилотных летательных аппаратов для Арктики и Крайнего Севера[1]

Разработана концепция автономной робототехнической системы на базе мобильного шасси с беспилотным летательным аппаратом для бесконтактной диагностики магистральных трубопроводов в условиях Арктики и Крайнего Севера.

Ключевые слова: робототехническая система, система диагностики, трубопровод, беспилотный летательный аппарат, нейронные сети, удаленный доступ.

The concept of an autonomous robotic system based on a mobile chassis with an unmanned aerial vehicle for contaetless diagnostics of main pipelines in the Arctic and the Far North conditions is developed.

Keywords: robotic system, diagnostic system, pipeline, unmanned aerial vehicle, neural networks, remote access.

Для безаварийной эксплуатации газо- и нефтепроводов необходимо обеспечить надежность металлических конструкций [1—3] и трубопроводных систем, выход из строя которых на линейных объектах нефтегазовой отрасли может нанести не только экономический ущерб ввиду потери продукта и нарушения непрерывности производства, но и вызвать загрязнение окружающей среды, а также стать причиной пожара и опасной ситуации. Повышения эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов особенно важно для регионов Крайнего Севера и Арктики, так как экстремально низкие температуры и динамические нагрузки со стороны грунта (морозное пучение, оттаивание, оползни, обводнение-заболачивание) вызывают значительные деформации трубопроводов, что повышает риск возникновения аварий и снижает ресурс трубопроводов.

Для повышения надежности трубопроводов применяют разные способы неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния, а также моделирование их напряженно-деформированного состояния в ходе эксплуатации. Как показывает практика, большинство способов неразрушающего контроля эффективно только при возможности непосредственного доступа к объекту диагностики, что требует больших материальных и временных затрат ввиду значительной протяженности магистральных трубопроводов. Поэтому все большую актуальность приобретают способы бесконтактного неразрушающего контроля, например, бесконтактная магнитометрическая диагностика, инфракрасная спектроскопия и визуальная оценка состояния с помощью аэрофотосъемки.

Преимущества бесконтактного неразрушающего контроля: высокая оперативность в обнаружении и локализации напряженно-деформированных участков (концентраторов напряжений), в том числе под слоем грунта и снега без снятия изоляции (магнитометрическая диагностика); обнаружение мест зарождения и развития трещин и коррозионных зон, утечек, разрушения гидро- и теплоизоляции; определение степени повреждения труб и опор, в том числе в труднодоступных местах и удаленных от оператора; диагностирование без предварительной подготовки исследуемой поверхности.

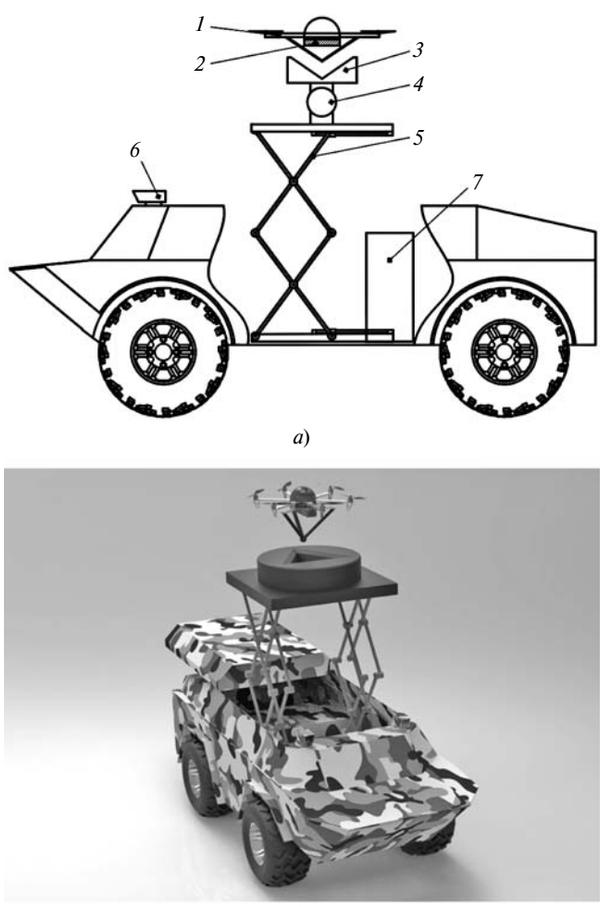
Низкая эффективность данных методов при диагностике трубопроводов в Арктике и Крайнем Севере обусловлена следующим: малый объем базы экспериментальных результатов по бесконтактной диагностике; сложность определения и интерпретации диагностических данных для разных условий эксплуатации трубопроводов; сложность выявления корреляционных связей между результатами диагностики и фактическим состоянием объекта; низкая автоматизация диагностики и обработки полученных данных, в том числе цифровых изображений, что значительно повышает влияние чело-

[1] Работа выполнена по гранту РНФ № 798 "Разработка программного и аппаратного обеспечения для системы интеллектуальной диагностики состояния транспортных средств и конструкций в условиях Арктики при удаленном доступе".

Ve618.fm Page 52 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

вческого фактора на точность результатов диагностики особенно при работе в тяжелых климатических условиях. Для повышения эффективности и качества диагностики необходимо применять новые методы и средства обработки диагностической информации, в том числе робототехнические средства, например, беспилотные летательные аппараты и мобильные платформы, обеспечивающие диагностику в удаленных труднодоступных местах в автоматическом режиме.

Для обработки больших объемов разнородных данных и автоматического управления автономными техническими объектами эффективно применять искусственные нейронные сети и осуществлять высокопроизводительные вычисления, позволяющие выявлять скрытые зависимости в крупных массивах данных, распознавать и классифицировать цифровую информацию и изображения в режиме реального времени, накапливать и систематизировать знания по исследуемому объекту, прогнозировать динамику изменения технического состояния объекта, а также определять оптимальные режимы функционирования (маршруты, траектории полета, скорость передвижения и т. д.) автономных технических систем.



а)

б)

Рис. 1. Схема (*а*) и внешний вид (*б*) автономной мобильной робототехнической системы:

1 — БПЛА; *2* — оборудование для бесконтактной диагностики трубопроводов; *3* — механизм стыковки; *4* — механизм калибровки БПЛА; *5* — подъемный механизм; *6* — стереокамера для распознавания объектов на местности; *7* — станция замены аккумуляторных батарей БПЛА

В НГТУ им. Р. Е. Алексеева разрабатываются новые методы и аппаратно-программные средства для диагностики и мониторинга технического состояния магистральных газо- и нефтепроводов, работающих в условиях Арктики и Крайнего Севера, с применением автономных мобильных робототехнических систем с беспилотными летательными аппаратами, позволяющие повысить эксплуатационную надежность протяженных участков и сократить риски возникновения техногенных аварий.

Автономная робототехническая система построена по модульному принципу и состоит из двух частей.

Первый модуль — беспилотное транспортное средство, оснащенное системой сенсоров, которая позволяет получать информацию о динамике изменяющейся среды. Она состоит из лазерных и ультразвуковых дальномеров, стереокамер, позволяющих получать подробную информацию о местности, бортового компьютера со специальным программным обеспечением, которое включает в себя обученные искусственные нейронные сети, алгоритмы планирования маршрута и режимов движения мобильной платформы, ориентации и навигации на местности на основании анализа полученных данных.

Второй модуль состоит из беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и сервисной платформы, включающей в себя: защитный корпус, подъемный механизм, гироплатформу, механизм стыковки, станцию замены аккумуляторных батарей, компьютер для управления полетом. Гироплатформа упрощает взлет и посадку на неровной поверхности и обеспечивает калибровку бортового компаса БПЛА. На БПЛА также можно устанавливать оборудование для мониторинга и диагностики различных объектов. В данной робототехнической системе можно применять БПЛА разных конструкций грузоподъемностью от 0,5 до 10 кг, обеспечивающие время полета от 10 до 120 мин.

Схема и внешний вид робототехнической системы представлены на рис. 1, *а*, *б*.

Для повышения точности позиционирования БПЛА при посадке используют систему машинного зрения и систему сантиметровой спутниковой навигации Real Time Kinematic (RTK), что позволяет с высокой точностью определять текущее местоположение БПЛА и в совокупности с полетным контроллером стабилизировать БПЛА при заходе на посадку. Совместно с RTK при посадке используют специальный графический маркер на поса-

Ve618.fm Page 53 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

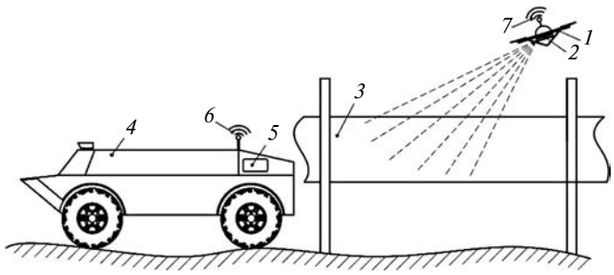


Рис. 2. Схема диагностики состояния магистрального трубопровода с использованием робототехнической системы с БПЛА:
1 — БПЛА; *2* — оборудование для бесконтактной диагностики; *3* — трубопровод; *4* — беспилотное транспортное средство; *5* — бортовой компьютер; *6*, *7* — устройства беспроводной связи

дочной платформе и систему захвата изображения на БПЛА для окончательного позиционирования и определения глиссады.

Схема работы автономной мобильной робототехнической системы представлена на рис. 2.

В темное время суток контур графического маркера на посадочной платформе подсвечивается. Это обеспечивает уверенный взлет и посадку БПЛА при ветре в 15 узлов с порывами до 25 узлов. При планировании маршрута полета БПЛА учитываются текущие и прогнозируемые погодные условия, определяемые с помощью встроенной метеостанции.

Диагностика состояния магистральных трубопроводов, принцип которой показан на рис. 2, осуществляется с использованием многофункционального подвесного устройства (МФПУ) для бесконтактного сбора данных. МФПУ состоит из магнитометрического датчика, цифровой камеры, лазерного датчика утечки метана и лазерного пирометра. Высокочувствительные феррозондовые датчики позволяют получать данные о состоянии магнитного поля земли на протяжении всего трубопровода на расстоянии до пяти диаметров исследуемой трубы. При полете над трубой БПЛА составляет карту распределения магнитного поля земли с привязкой к координатам GPS и последующей передачей в блок интеллектуального анализа данных автономной роботизированной системы. По изменению распространения магнитного поля можно судить о напряженно-деформируемом состоянии трубопровода и оценивать степень его повреждения. Для повышения точности мониторинга дополнительно используют графическую информацию с цифровых камер. Полученные снимки в режиме реального времени передаются на бортовой компьютер мобильного шасси. Классификация снимков по степени повреждения трубопровода и его изоляции осуществляется с помощью искусственной нейронной сети глубокого обучения.

Схема диагностики состояния магистрального трубопровода представлена на рис. 3.

Окончательная диагностика осуществляется при точной локализации мест утечек с помощью детектора метана. Кроме того, для анализа полученных сигналов используют дополнительную информацию о динамических показателях полета БПЛА на основании показаний бортового акселерометра и данные инфракрасного пирометра. Все данные передаются с использованием протокола MAVLink (Micro Air Vehicle Link), обеспечивающего надежное соединение в радиусе 5 км. После обработки полученной информации автоматически формируется отчет по диагностике трубопровода, в котором указываются наиболее опасные участки с привязкой к координатам GPS и прилагаются фотоизображения. Полученный отчет передается через радиоканал на ближайший пост диагностики для принятия окончательного решения.

Рис. 3. Схема диагностики состояния магистрального трубопровода с помощью автономной интеллектуальной робототехнической системы с БПЛА

Ve618.fm Page 54 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.923:621.922

Ю. В. ДИМОВ, д-р техн. наук, Д. Б. ПОДАШЕВ, канд. техн. наук (Иркутский национальный исследовательский технический университет), e-mail: Dimov-Ura@yandex.ru

Исследование сил взаимодействия эластичного абразивного круга с обрабатываемой заготовкой

Предложено аналитическое определение нормальной составляющей силы обработки при шлифовании эластичными абразивными кругами с учетом того, что абразивный круг с упруговязкими свойствами за один оборот не успевает полностью восстановить форму.

Ключевые слова: эластичный абразивный круг, сила резания, упруго-вязкая и центробежная составляющие, жесткость, деформация, напряжение.

The analytical determination of the normal component of the treatment force at grinding by elastic abrasive wheels is proposed taking into account, that an abrasive wheel with elastic-viscous properties can not completely restore its shape in one revolution.

Keywords: elastic abrasive wheel, cutting force, elastic-viscous and centrifugal components, stiffness, deformation, stress.

Эластичные абразивные круги (ЭАК) применяются при финишной обработке поверхностей для достижения требуемой шероховатости. Силы, возникающие при обработке, во многом определяют формирование поверхностного слоя, температуру в зоне обработки, изнашивание инструмента и производительность процесса.

Рассмотрим определение нормальной составляющей P_y силы обработки, которая определяет глубину внедрения режущих элементов шлифовального круга (ШК), а следовательно, и интенсивность съема материала, и шероховатость обработанной поверхности.

Составляющая P_y силы обработки в свою очередь включает в себя упруговязкую и центробежную составляющие.

Упруговязкая составляющая силы обработки

Исследования ЭАК показали, что их материалы обладают упруговязкими свойствами. В расчетах для ЭАК следует принять линейные законы напряжений и деформаций. Зависимость между напряжением, деформацией и скоростью деформации [1] имеет вид:

$$\sigma + \xi\dot{\sigma}_в = E\varepsilon + \chi\dot{\varepsilon}_в. \qquad (1)$$

Здесь $E = C_r d$ — модуль упругости материала ЭАК, где C_r — жесткость материала ЭАК на единице площади; $d = R_k - r_k$ — длина деформированного участка ЭАК (R_k и r_k — внешний радиус и радиус отверстия ЭАК); $\varepsilon = \Delta y/d$ — относительная дефор-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 51)

Ориентация БПЛА в пространстве при диагностике трубопровода происходит на основании данных GPS и ГЛОНАСС, а также анализа полученных изображений. В блок управления БПЛА входит нейропроцессор, способный распознавать определенный класс объектов, в том числе и трубопроводы, что обеспечивает курсовую стабилизацию при диагностике участка магистрали. Для стабилизации высоты полета над трубопроводом применяют оптические датчики положения и сонары. Определение положения БПЛА над трубопроводом на всем его протяжении является важным аспектом диагностики, так как распределение магнитного поля значительно зависит от расстояния до трубы.

Своевременное обнаружение дефектов в магистральных трубопроводах уменьшает вероятность возникновения техногенных катастроф и загрязнения окружающей среды. А предлагаемая автономная интеллектуальная робототехническая система для мобильной диагностики состояния трубопроводов позволит осуществлять их контроль круглосуточно. Данная технология рациональна, рентабельна и безопаснее диагностики, осуществляемой при непосредственном участии человека.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Кабалдин Ю. Г., Аносов М. С., Зиновьев Ю. А.** Исследование хладостойкости материалов для ответственных узлов технических средств, работающих при низких температурах // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 4. № 2. С. 14—17.

2. **Системы** интеллектуальной диагностики состояния структурной устойчивости элементов конструкций и транспортных машин в условиях низких температур / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, И. Л. Лаптев, М. С. Аносов // В сборнике: Science XXI century Proceedings of materials the international scientific conference. 2015. С. 62—70.

3. **Разрушение** конструкций при работе в условиях пониженных температур и диагностика устойчивости структурного состояния материала / Ю. Г. Кабалдин, И. Л. Лаптев, Д. А. Шатагин и др. // Вестник машиностроения. 2016. № 1. С. 60—64.

Ve618.fm Page 55 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

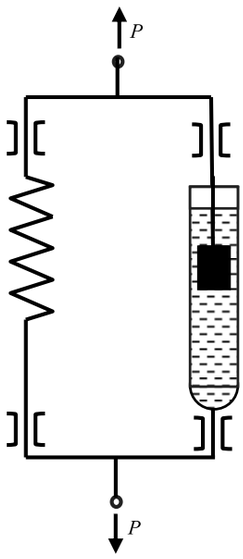


Рис. 1. Модель упруговязкого тела, обладающего наследственностью

мация ЭАК, где Δy — деформация ЭАК (задается при настройке режима обработки); χ — коэффициент линейной вязкости материала; $\dot{\sigma}_в$ — скорость изменения напряжений при вязкой деформации; ξ — коэффициент изменения скорости напряжений; $\dot{\varepsilon}_в$ — скорость вязкой деформации.

По уравнению (1) можно построить модель упруговязкого тела (рис. 1), обладающего наследственностью, но не способного к релаксации.

В исследовании использовали ЭАК фирмы 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company) (табл. 1), изготовленные из абразивного материала Scotch-Brite™, который состоит из синтетических волокон, образующих трехмерное нетканое полотно с равномерно распределенными по объему абразивными зернами.

Экспериментальное исследование упруговязкого восстановления после деформации ЭАК

Так как исследуемые ЭАК характеризуются малой жесткостью, а силы деформации небольшие, применение стандартных средств измерения их деформации и восстановления невозможно. Поэтому исследование проводили на специальной установке (рис. 2).

Исследуемый ЭАК *5*, закрепленный на оправке *9* гайкой *10*, устанавливали на призмах *11*. Под действием груза *1* через рычаг *6* и нагрузочную пяту *4* ЭАК деформируется на заданную величину, которая регистрируется индикатором *2*. После снятия груза *1* величина $\delta y_в$ упруговязкого восстановления (УВВ) фиксируется с помощью индикатора *2* и высокоскоростной съемки (30 кадров/с). Полученные результаты представлены в табл. 2.

По полученным результатам построили график УВВ ЭАК:

$$\delta y_в = at_в + b. \qquad (2)$$

Значения коэффициента a и свободного члена b в уравнении (2) приведены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры ЭАК

ЭАК	D_k, мм	B_k, мм	R_k, мм	D_k, мм	m, кг	γ_k, кг/м^3	Абразив	Z, мкм	C_r, Н/(мм^2 · мм)
FS-WL-8AMED	140,5	26,0	17,5	25,4	0,278	712,77	Al_2O_3	50—60	0,1419
FS-WL-6SFIN	129,5	25,5	17,5	25,4	0,162	501,63	SiC	45—50	0,1643
FS-WL-2SCRS	147,2	26,0	17,5	25,4	0,162	377,37	SiC	~200	0,0830
DB-WL-8SMED	147,8	25,6	17,5	25,4	0,284	666,29	SiC	50—60	0,2286
SF-FB-0,5AFIN	193,0	50,0	45,0	76,5	0,418	339,03	Al_2O_3	45—50	0,0158

Примечание. D_k — диаметр; B_k — ширина; m — масса; γ_k — плотность материала; Z — зернистость.

Таблица 2

Значения коэффициента *a* и свободного члена *b* в формуле (2) для разных ЭАК

Δy, мм	FS-WL-8AMED		FS-WL-6SFIN		FS-WL-2SCRS		DB-WL-8SMED		SF-FB-0,5AFIN	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
1,0	5,000	−0,125	7,30	−0,220	7,95	−0,247	4,2	−0,128	—	—
1,5	7,939	−0,162	16,80	−0,374	15,20	−0,482	7,6	−0,210	—	—
2,0	5,100	−0,143	16,69	−0,450	18,25	−0,547	7,6	−0,210	—	—
2,5	—	—	—	—	—	−0,482	—	—	—	—
3,0	—	—	—	—	—	−0,303	—	—	19,50	−0,433
3,5										
4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	18,28	−0,383
4,5										

Ve618.fm Page 56 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

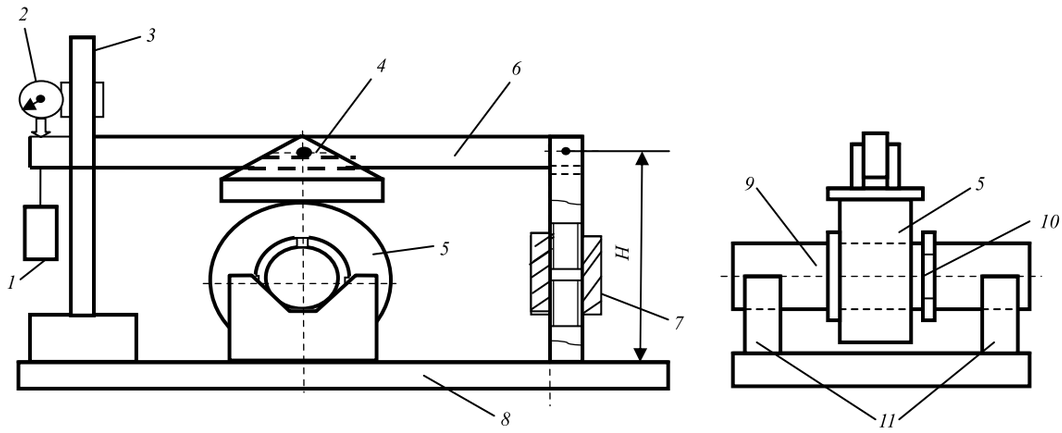


Рис. 2. Схема установки для определения жесткости ЭАК:
1 — груз; *2* — индикатор; *3* — штатив; *4* — нагрузочная пята; *5* — ЭАК; *6* — рычаг; *7* — механизм регулировки высоты; *8* — корпус; *9* — оправка; *10* — гайка; *11* — призмы

По схеме взаимодействия ЭАК с плоской обрабатываемой поверхностью (рис. 3) получена формула средней деформации ЭАК при УВВ:

$$\overline{\delta y}_{\text{в}} = \frac{R_k\left(\frac{\pi\varphi_{\text{в}}}{90} - \sin 2\varphi_{\text{в}}\right)}{4\sin\varphi_{\text{в}}}.$$

При известной деформации $\delta y_{\text{в}}$ ЭАК угол $\varphi_{\text{в}}$ определяется выражением

$$\cos\varphi_{\text{в}} = 1 - \frac{\delta y_{\text{в}}}{R_k}.$$

Относительная деформация ЭАК при УВВ составит:

$$\varepsilon_{\text{в}} = \frac{\overline{\delta y}_{\text{в}}}{d}.$$

Скорость деформации при УВВ после разгрузки

$$\dot{\varepsilon}_{\text{в}} = \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{t_{\text{в}}}.$$

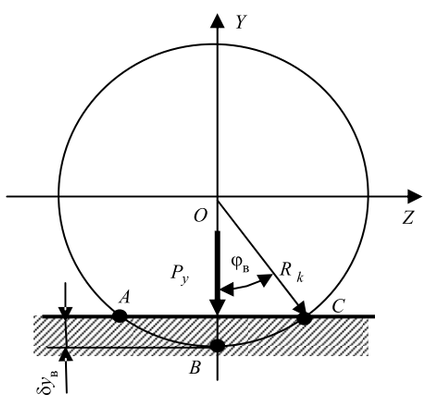


Рис. 3. Схема взаимодействия ЭКА с плоской обрабатываемой поверхностью

Напряжение при УВВ:

$$\sigma_{\text{в}} = -C_r d\varepsilon_{\text{в}}.$$

Коэффициент линейной вязкости материала ЭАК находим по формуле

$$\chi = \frac{\sigma_{\text{в}}}{\dot{\varepsilon}_{\text{в}}}.$$

При заданной начальной деформации Δy средняя деформация составит:

$$\overline{\Delta y} = \frac{R_k\left(\frac{\pi\varphi}{90} - \sin 2\varphi\right)}{4\sin\varphi},$$

где угол φ определим из выражения

$$\cos\varphi = 1 - \frac{\Delta y}{R_k}.$$

Тогда с учетом формулы (1) напряжение в зоне контакта ЭАК с обрабатываемой поверхностью имеет вид:

$$\sigma = C_r \mathrm{d}\varepsilon + \chi\dot{\varepsilon}_{\text{в}} - \xi\dot{\sigma}_{\text{в}},$$

где $\varepsilon = \dfrac{\overline{\Delta y}}{d}$ — относительная средневзвешенная деформация ЭАК; $\dot{\sigma}_{\text{в}} = \dfrac{\sigma_{\text{в}}}{t_{\text{в}}}$ — скорость изменения напряжений при вязкой деформации.

Коэффициент ξ изменения скорости напряжений зависит от параметров обработки, т. е. от деформации Δy ЭАК, скорости v резания и подачи S, определяют экспериментально, его формула

$$\xi = (d_1 v^2 + d_2 v + d_3)(d_4\Delta y^2 + d_5\Delta y + d_6) \times \\ \times (d_7 S^2 + d_8 S + d_9). \qquad (3)$$

Ve618.fm Page 57 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Таблица 3

Значения коэффициента и свободного члена в формуле (3) для разных ЭАК

Коэффициент	FS-WL-8AMED	FS-WL-6SFIN	FS-WL-2SCRS	DB-WL-8SMED	SF-FB-0,5AFIN
d_1	$8{,}739 \cdot 10^{-4}$	0,0102358	0,020298	0,154432	0,01215
d_2	−0,2722	−0,159082	−0,232314	−3,04045	−0,287834
d_3	0,03734	0,66605	0,61454	14,2756	1,7478
d_4	−6,70369	19,6414	1,153	4,6666	0,125
d_5	15,0926	−62,2897	−3,4349	−11,9281	−0,1101
d_6	−6,55554	50,2414	2,381	8,3923	−0,5596
d_7	$-2{,}013 \cdot 10^{-7}$	$-5{,}901 \cdot 10^{-7}$	$-4{,}6556 \cdot 10^{-6}$	$7{,}088 \cdot 10^{-8}$	$-1{,}0486 \cdot 10^{-6}$
d_8	$3{,}153 \cdot 10^{-4}$	$1{,}015 \cdot 10^{-4}$	$5{,}70758 \cdot 10^{-3}$	$-5{,}4287 \cdot 10^{-4}$	$-2{,}8299 \cdot 10^{-3}$
d_9	0,96241	0,9968	0,336694	1,06938	1,3856

Значения коэффициентов d_1—d_{10} и свободного члена d_{11} приведены в табл. 3.

Так как напряжение в материале ЭАК при взаимодействии с деталью в соответствии с уравнением (1) остается неизменным, упругая составляющая силы обработки имеет вид:

$$P_{\text{уп}} = \sigma S_{\text{в}},$$

где $S_{\text{в}}$ — площадь контакта ЭАК с обрабатываемой поверхностью после УВВ.

Ширина контакта ЭАК с заготовкой меняется в зависимости от условий обработки, в расчетах принимаем ширину, равную 1 мм. Тогда площадь контакта составит:

$$S_{\text{в}} = 2R_k \sin\varphi_{\text{в}}.$$

Центробежная составляющая силы обработки

Для определения центробежной составляющей $P_{\text{ц}}$ силы обработки необходимо знать объем упругодеформированного материала ЭАК:

$$P_{\text{ц}} = \frac{m_{\text{д}} v_{\text{ц}}^2}{R_{\text{ц}}}. \qquad (4)$$

Здесь $m_{\text{д}} = \gamma_k S_{\text{д}}$ — масса деформированного участка ЭАК, где $S_{\text{д}}$ — площадь упругодеформированного участка на 1 мм ширины ЭАК; $v_{\text{ц}} = \dfrac{\pi n R_{\text{ц}}}{30}$ — окружная скорость центра тяжести деформированного участка, м/с ($R_{\text{ц}}$ — расстояние от центра ЭАК до центра тяжести; n — частота вращения ЭАК, мин$^{-1}$).

Определение объема упругодеформированного участка ЭАК

Для определения объема деформированного материала воспользуемся задачей о сосредоточенной силе, приложенной к точке прямого края полубесконечной пластины из теории упругости [1].

Доказано, что если провести окружность произвольного диаметра d, касающуюся верхнего края в точке приложения внешней силы (рис. 4), то для всех точек этой окружности радиальные напряжения составят:

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi d}, \qquad (5)$$

где P — сосредоточенная вертикальная погонная сила.

При обработке на заготовку действуют силы, пропорциональные деформации ЭАК. В точке A (рис. 5) действует наибольшее напряжение и оно пропорционально деформации $\delta y_{\text{в}}$. При этом величина d не может превышать $R_k - r_k - \delta y_{\text{в}}$. По формуле (5) напряжение σ_r в точке G, как показал расчет, бесконечно мало. В точках M и N деформации равны нулю, следовательно, и напряжения равны нулю. Принимаем, что отрезки DF и AG пропорциональны отрезкам DC и AB при любом значении угла φ_i. При этом $CD = \delta y_{\text{в}} - R_k(1 - \cos\varphi_i)$. Тогда

$$DF = -\frac{d[\delta y_{\text{в}} - R_k(1 - \cos\varphi_i)]}{\delta y_{\text{в}}};$$

$$CF = DF + CD = \frac{d[\delta y_{\text{в}} - R_k(1 - \cos\varphi_i)]}{\delta y_{\text{в}}} + \\ + [\delta y_{\text{в}} - R_k(1 - \cos\varphi_i)]. \qquad (6)$$

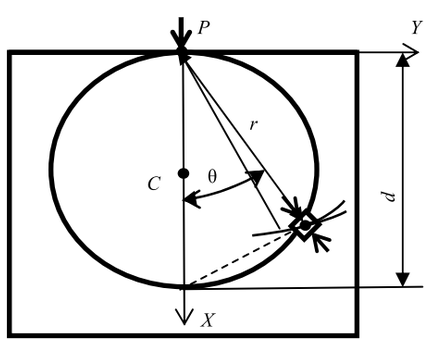


Рис. 4. Линии равных радиальных напряжений

Ve618.fm Page 58 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

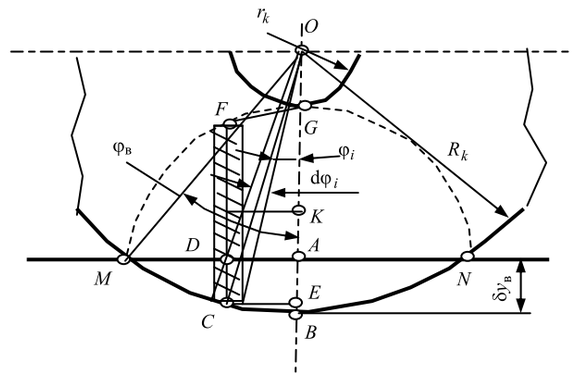


Рис. 5. Схема к расчету площади деформированного материала АК

Из выражения (6) получим:

$$CF = \left(\frac{d}{\delta y_в} + 1\right)[\delta y_в - R_k(1 - \cos\varphi_i)], \qquad (7)$$

где $d = R_k - r_k - \delta y_в$.

Элементарную площадь ds (см. рис. 5, заштрихованная зона) определяет выражение

$$\mathrm{d}s = \left(\frac{d}{\delta y_в} + 1\right)[\delta y_в - R_k(1 - \cos\varphi_i)]R_k\mathrm{d}\varphi_i.$$

Площадь деформированного участка определяет формула

$$S_д = \int_0^{\varphi_в}\left(\frac{d}{\delta y_в} + 1\right)[\delta y_в - R_k(1 - \cos\varphi_i)]R_k\mathrm{d}\varphi_i,$$

где $\cos\varphi_в = 1 - \dfrac{\delta y_в}{R_k}$ (см. рис. 5).

После преобразования и интегрирования получим:

$$S_д = 2R_k(A\varphi + B\sin\varphi),$$

где

$$A = (d + \delta y_в)\left(1 - \frac{R_k}{\delta y_в}\right); \quad B = R_k\left(\frac{d}{\delta y_в} + 1\right).$$

Расстояние от центра ЭАК до центра тяжести $R_ц$ определяет выражение

$$R_ц = \frac{M}{S_д}.$$

Здесь M — момент площади деформированного участка; $\mathrm{d}M = R_i\mathrm{d}S_д$:

$$M = 2\int_0^{\varphi_в}(CF)R_iR_k\mathrm{d}\varphi_i, \qquad (8)$$

где R_i — расстояние от центра ЭАК до центра тяжести элементарного участка площадью d$S_д$:

$$R_i = \frac{R_k - 0{,}5(A + B\cos\varphi_i) - R_k(1 - \cos\varphi_i)}{\cos\varphi_i}. \qquad (9)$$

Подставив формулы (7) и (9) в выражение (8), получим:

$$M = 2R_k\int_0^{\varphi_в}\Bigg[[AR_k - AB + B\left(R_k - \frac{1}{2}B\right)\cos\varphi_i - \frac{A^2}{2\cos\varphi_i}\Bigg]\mathrm{d}\varphi_i.$$

Таким образом, все необходимые данные для расчета центробежной составляющей силы обработки по формуле (4) определены.

Тангенциальная составляющая силы обработки

В соответствии с теорией взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемым материалом, изложенной в работе [2], нормальная (P_{y1}) и тангенциальная (P_{z1}) составляющие силы резания для единичного зерна составят:

$$\begin{aligned} P_{y1} &= Kr^2f_y; \\ P_{z1} &= Kr^2f_z. \end{aligned} \qquad (10)$$

Здесь K — предел текучести на сдвиг; r — математическое ожидание радиуса средней приведенной кривизны всех вершин [2]; f_y и f_z — коэффициенты, формулы которых приведены в аппроксимированном виде в работе [2]:

$$\begin{aligned} f_y &= 14{,}387\varepsilon_E^{0{,}895}; \\ f_z &= 7{,}1\varepsilon_E, \end{aligned} \qquad (11)$$

где $\varepsilon_E = E(y_E)/r$ — относительная величина внедрения зерен, здесь $E(y_E)$ — математическое ожидание глубины внедрения абразивных зерен в заготовку [2].

Зная P_y, по формулам (10) и (11) можно найти тангенциальную составляющую обработки: $P_z = 0{,}4915P_y\varepsilon_E^{0{,}105}$.

Так как P_z определяется по нормальной составляющей, то в данной статье эта составляющая не рассматривается.

Расчетные значения упругой и центробежной составляющих силы обработки, а также нормальной составляющей приведены в табл. 4—8, в которых $P_{y\,э}$ и $P_{y\,т}$ — соответственно экспериментальная и теоретическая силы. Параметры обработки

Ve618.fm Page 59 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

(скорость v резания, деформация Δy и подача S) приняты в соответствии с рекомендациями работ [3] и [4].

Экспериментальные данные получены на фрезерном станке Deckel Maho DMC 635V с помощью трехкомпонентного динамометра 9257B фирмы Kistler (Швейцария) [5].

Таблица 4

Результаты расчета для ЭАК FS-WL-8AMED

v, м/с	S, мм/мин	Δy, мм	$P_{y\,э}$, Н	$P_{уп}$, Н	$P_{ц}$, Н	$P_{y\,т}$, Н
3,68	130	1,5	2,252	2,052	0,071	2,123
7,36			2,221	2,117	0,180	2,297
11,77			2,178	1,872	0,302	2,174
14,71			2,121	1,706	0,354	2,059
11,77	130	1,0	0,927	0,934	0,205	1,139
		1,5	2,178	1,872	0,302	2,174
		2,0	3,928	2,605	0,180	2,786
11,77	42	1,5	2,208	1,907	0,302	2,209
	130		2,178	1,872	0,302	2,174
	255		2,137	1,829	0,302	2,131
	395		2,094	1,794	0,302	2,096

Таблица 5

Результаты расчета для ЭАК FS-WL-6SFIN

v, м/с	S, мм/мин	Δy, мм	$P_{y\,э}$, Н	$P_{уп}$, Н	$P_{ц}$, Н	$P_{y\,т}$, Н
6,78	130	1,5	3,078	2,935	0,144	3,079
10,85			3,052	2,820	0,234	3,054
13,56			3,019	2,756	0,261	3,017
10,85	130	1,0	1,567	1,460	0,107	1,567
		1,5	3,052	2,82	0,234	3,054
		2,0	5,111	4,917	0,194	5,111
10,85	42	1,5	3,053	2,820	0,234	3,054
	130		3,052	2,82	0,234	3,054
	255		3,031	2,802	0,234	3,037
	385		2,983	2,751	0,234	2,985

Таблица 6

Результаты расчета для ЭАК FS-WL-2SCRS

v, м/с	S, мм/мин	Δy, мм	$P_{y\,э}$, Н	$P_{уп}$, Н	$P_{ц}$, Н	$P_{y\,т}$, Н
3,85	130	2,5	2,220	1,267	0,056	2,222
7,71			2,145	2,016	0,126	2,142
12,33			1,891	1,745	0,146	1,891
12,33	130	2,0	1300	1,117	0,182	1,299
		2,5	1,891	1,745	0,146	1,891
		3,0	2,333	2,208	0,125	2,333
12,33	42	2,5	1,554	1,408	0,146	1,554
	130		1,891	1,745	0,146	1,891
	255		2,273	2,128	0,146	2,274
	395		2,567	2,422	0,146	2,568

Таблица 7

Результаты расчета для ЭАК DB-WL-8SMED

v, м/с	S, мм/мин	Δy, мм	$P_{y\,э}$, Н	$P_{уп}$, Н	$P_{ц}$, Н	$P_{y\,т}$, Н
7,74	130	1,5	2,485	2,315	0,170	2,485
12,38			2,340	2,100	0,240	2,340
15,48			2,188	2,002	0,184	2,186
12,38	130	1,0	0,951	0,800	0,151	0,951
		1,5	2,340	2,100	0,240	2,340
		2,0	4,285	4,043	0,240	4,283
12,38	42	1,5	2,371	2,131	0,240	2,371
	130		2,340	2,100	0,240	2,340
	255		2,299	2,058	0,240	2,298
	395		2,254	2,013	0,240	2,253

Таблица 8

Результаты расчета для ЭАК SF-FB-0,5AFIN

v, м/с	S, мм/мин	Δy, мм	$P_{y\,э}$, Н	$P_{уп}$, Н	$P_{ц}$, Н	$P_{y\,т}$, Н
10,472	130	4	1,280	1,027	0,254	1,281
16,755			1,476	1,052	0,423	1,475
20,944			1,656	1,167	0,489	1,656
16,755	130	3	0,964	0,543	0,420	0,963
		3,5	1,208	0,786	0,423	1,209
		4,0	1,476	1,052	0,423	1,475
		4,5	1,770	1,346	0,423	1,769
16,755	42	4	1,5925	1,170	0,423	1,593
	130		1,476	1,052	0,423	1,475
	255		1,298	0,872	0,423	1,296
	395		1,078	0,654	0,423	1,078

Расчетные значения нормальной составляющей P_y силы обработки хорошо коррелируют с экспериментальными данными, следовательно, предложенное аналитическое определение данного параметра можно рекомендовать для инженерных расчетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Безухов Н. И.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1968. 512 с.

2. **Димов Ю. В.** Обработка деталей свободным абразивом. Иркутск: ИрГТУ, 2000. 293 с.

3. **Димов Ю. В., Подашев Д. Б.** Производительность и качество поверхности при обработке эластичными абразивными кругами // Металлообработка. 2012. № 4 (70). С. 7—12.

4. **Димов Ю. В., Подашев Д. Б.** Оптимизация процесса обработки деталей эластичными абразивными кругами // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 65—69.

5. **Димов Ю. В., Подашев Д. Б.** Силы резания при обработке эластичными абразивными кругами // Вестник ИрГТУ. 2015. № 7 (102). С. 47—55.

Ve618.fm Page 60 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.793

В. Н. ГАДАЛОВ, д-р техн. наук, С. Г. ЕМЕЛЬЯНОВ, д-р техн. наук,
Е. А. ФИЛАТОВ, И. А. МАКАРОВА, В. Г. САЛЬНИКОВ, канд. техн. наук
(Юго-Западный ГУ, г. Курск), e-mail: Don_filius@mail.ru

Диффузионное борирование доэвтектоидных инструментальных сталей. Технологии, структуры, фазовые составы и свойства материалов

Исследованы конструкционные, доэвтектоидные конструкционные и инструментальные стали. Рассмотрены технологии борирования. Представлены схемы установки для электролизного борирования, модернизированного жаростойкого литого тигля и режимы электролизного борирования. Выявлены недостатки электролизного борирования.

Ключевые слова: борирование, бура, тигель, электролиз, сталь, бориды, боридное покрытие, порошковая смесь, обмазка.

The structural, pre-eutectoid structural and tool steels are studied. The technologies of boriding are considered. The schemes of the installation for electrolytic boriding, modernized heat-resistant cast crucible and electrolytic boriding modes are presented. The disadvantages of electrolytic boriding are revealed.

Keywords: boriding, borax, crucible, electrolysis, steel, borides, boride coating, powder mixture, lute.

Одним из эффективных способов повышения эксплуатационных свойств стальных изделий, работающих в условиях высоких нагрузок, абразивного и эрозионного изнашивания, значительных изменений температур и давлений, а также в агрессивных средах, является борирование. Данный процесс химико-термической обработки (ХТО) [1—15] заключается в диффузионном насыщении поверхностных слоев бором изделий из металлов и сплавов путем их нагревания в борсодержащей среде. Наиболее часто для повышения износостойкости и коррозионной стойкости борирование осуществляют в растворах кислот металлов и сплавов, получая борированные слои твердостью 18÷20 ГПа, которая сохраняется при температуре 800 °С. На воздухе, а также при эксплуатации в природных и промышленных водах борированные стали имеют низкую коррозионную стойкость.

Борированию можно подвергать практически все конструкционные и инструментальные стали. Детали, прошедшие данную ХТО, можно эксплуатировать в условиях трения скольжения без смазочного материала, абразивного изнашивания, изнашивания в разряженной среде, при повышенных температурах, в агрессивных средах. Для металлургического оборудования чаще всего применяют электролизное борирование (крупные партии деталей) и борирование с помощью порошков, паст и обмазок (единичные детали). Крупногабаритные детали, особенно при необходимости местного борирования, целесообразно насыщать с помощью обмазок или паст.

Электролизное борирование осуществляют при температурах 900÷980 °С в течение 2÷5 ч при плотности тока $J = 0{,}08 \div 0{,}25$ А/см^2, тем самым получают слой глубиной 0,16÷0,28 мм, который обладает высокими твердостью, плотностью и износостойкостью. Борирование осуществляют в расплавленной буре или в смеси буры с поваренной солью. При этом деталь является катодом, а в качестве анодов используют графитовые стержни.

Для борирования используют специальные установки (рис. 1), в состав которых входят: печь-ванна, система питания током и система автоматического контроля и регулирования температуры. Печи-ванны для электролизного борирования изготовляют на базе существующих шахтных электрических печей. Использу-

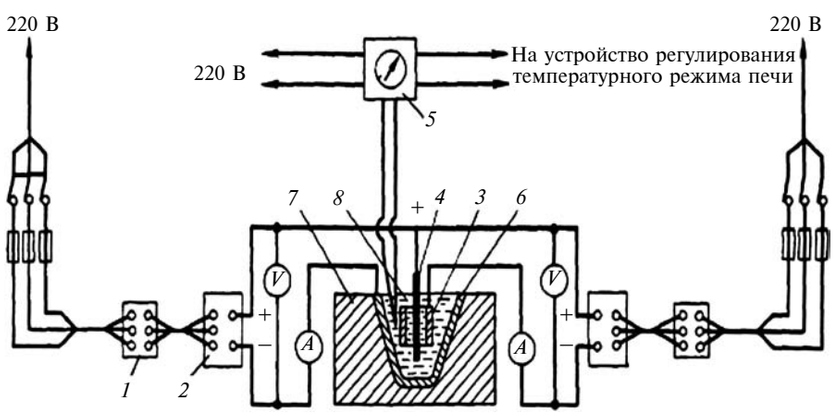


Рис. 1. Установка для электролизного борирования:

1 — регулятор напряжения; *2* — выпрямитель; *3* — деталь (катод); *4* — графитовый электрод (анод); *5* — потенциометр; *6* — стальной тигель (катод); *7* — печь-ванна; *8* — бура

Ve618.fm Page 61 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

ют литые, сварные или сварнолитые тигели из жаропрочной стали Х12Н26 [10]. В качестве источников постоянного тока можно использовать мотор-генераторы АНД 250/500 или АНД 750/1500, применяют выпрямители ВАГГ-12/600, ВАГГ-12/300 или ВКГ-100А напряжением от 6 до 24 В. Графитовые стержни-аноды должны иметь высокие прочность и термостойкость. Практика показала, что целесообразно применять графитовые электроды ЭГ-0 диаметром 50 и 75 мм и длиной 1000 мм.

Основной недостаток электролизного борирования — низкая стойкость тиглей. Для ее повышения применяют катодную защиту, т. е. на тигель подают отрицательный потенциал, при этом плотность тока на рабочей поверхности тигля составляет 0,008÷0,015 А/см^2. Это позволяет увеличить непрерывную работу тигля до 2400 ч.

Ранее жаростойкий тигель изготовляли сварнолитым: литой фланец, приставленный к верхнему торцу печи, приваривали непосредственно к тиглю; тигель и фланец отливали из сплава Х25Н20. По сварному шву расплавленная бура быстро разъедала тигель.

Применение цельнолитого тигеля (рис. 2) позволяет использовать сталь 12Х18Н9Л, а катодная защита увеличивает его срок службы до 6000 ч.

При использовании расплава буры с поваренной солью при повышенной температуре наблюдалось усиленное выделение газообразного хлора, что обусловило необходимость установки вентиляционного оборудования, который усилил мощность вентиляции на всем участке борирования.

Электролизное борирование [8, 9] осуществляют в расплаве буры при температуре 900÷950 °С и катодной плотности тока 1600÷2000 А/м^2 в течение 1,5÷3 ч.

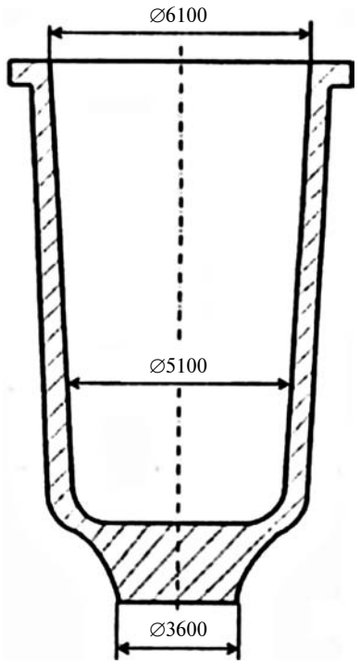


Рис. 2. Модернизированный жаростойкий тигель повышенной долговечности (цельнолитое утолщенное дно)

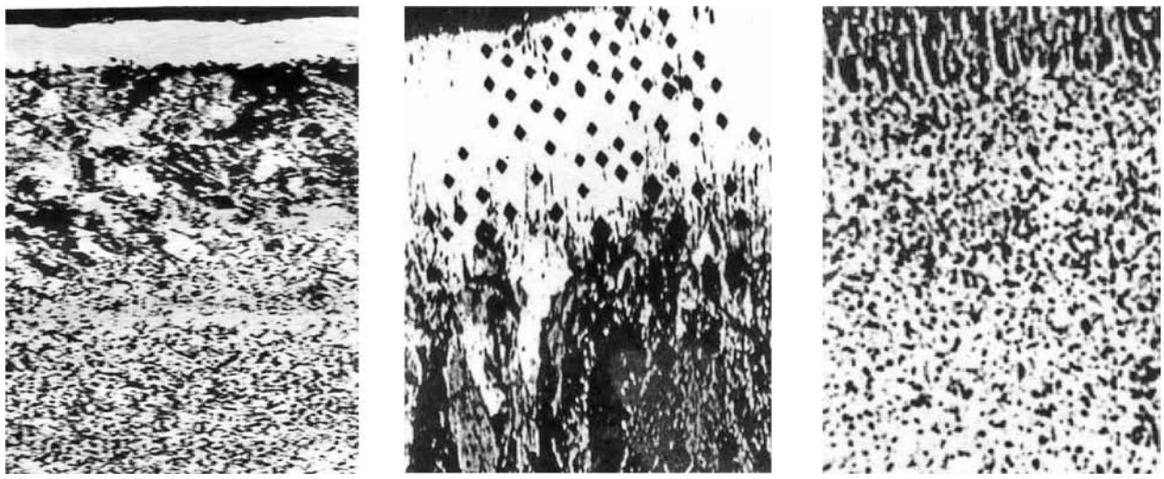
Рассмотрим подготовку установки электролизного насыщения бором к работе. В печь загружают буру ($Na_2B_4O_7 + 10H_2O$) до половины высоты тигля, затем печь нагревают до 500÷550 °С и выдерживают буру до полного испарения кристаллизационной влаги. Далее печь нагревают до рабочей температуры, бура расплавляется. Небольшими порциями добавляют предварительно расплавленную буру до необходимого уровня.

В производственных условиях жидкостное электролизное борирование осуществляют в металлическом тигле, в котором расплавляют буру, постепенно (по 8÷10 кг) забрасывая ее в тигель. В расплав погружают обрабатываемую деталь, находящуюся в графитовом стержне.

Деталь подключают к отрицательному полюсу источника постоянного тока (катод), а графитовый стержень — к положительному полюсу (анод). Электроды устанавливают после того, как уровень ванны достигает 1/4 высоты тигля. При этом концы электродов должны находиться на расстоянии не менее 100 мм от дна тигля и не менее 30 мм от его стенок. В электродержатель подают охлажденную воду и включают ток защиты тигля. Как правило, обработку осуществляют при плотности тока 0,15÷0,2 А/см^2 на борируемой поверхности при напряжении 10÷14 В. По мере заполнения ванны силу тока повышают до нужной величины. По достижении рабочей температуры (930÷950 °С) в ванну плавно погружают детали и выдерживают в ней 2,5÷3 ч. Глубина борированного слоя достигает 0,15÷0,20 мм. При выдержке до 6 ч можно получить слой толщиной до 0,35 мм. Дальнейшее увеличение выдержки, повышение температуры более 980 °С и плотности тока выше 0,2 А/см незначительно увеличивает глубину слоя, при этом повышается его хрупкость. По окончании процесса ток выключают, деталь извлекают из ванны, охлаждают (закаливают) на воздухе или в масле, промывают в кипящей воде 1÷2 ч и подвергают отпуску в режиме, принятом для данной стали. Перед борированием поверхность детали следует очистить от следов масла, окалины и других загрязнений.

Для защиты отдельных участков детали от борирования выполняют гальваническое меднение или хромирование. Неполное погружение детали в ванну для местного борирования непригодно ввиду сильного разъедания металла на границе расплава и воздуха. Недостатком жидкостного электролизного борирования, кроме низкой стойкости тиглей, является повышенный расход буры, так как не весь выделяющий бор участвует в формировании покрытия. Часть бора образует аморфный слой, который приваривается к поверхности, ухудшает ее чистоту и препятствует адсорбции активного бора. Аморфный слой бора уно-

Ve618.fm Page 62 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Микроструктура боридного слоя на стали 45:
а — композит стали 45 с боридным покрытием (×200); *б* — боридное покрытие (×280); *в* — переходная зона (×200)

сится из электролита вместе с изделием и частично остается в электролите, загрязняя его. В результате при многократном использовании насыщающей среды в ней накапливается аморфный бор, который внедряется в слой боридов, создает пористость и ухудшает свойства боридного покрытия.

Для повышения качества и стойкости покрытия к разрушению под действием динамических нагрузок можно использовать электролизное борирование (а. с. 637462 СССР). Электролиз расплавленных борсодержащих сред осуществляют в два этапа. На первом этапе выполняют электролиз при плотности катодного тока 0,07÷0,09 А/см^2 в течение 8÷10 мин. При этом образуются центры кристаллизации боридов, которые, сталкиваясь при увеличении, формируют сплошной слой. На втором этапе плавно снижают плотность тока до нуля в течение 1,5÷2 ч (время зависит от химического сплава). Происходит рассасывание высокобористой фазы, что способствует уменьшению внутренних напряжений и повышению сопротивляемости разрушению под действием динамических нагрузок.

Данная технология была реализована на доэвтектоидной стали 45.ЭБ1. В предварительно расплавленный в графитовом электролизере борсодержащий расплав ($Na_2B_4O_4$ + 20 % NaF) помещают детали, подключив положительный полюс к электролизеру, а отрицательный к насыщаемым изделиям. Электролиз осуществляют при температурах 700÷950 ˚С (зависит от состава среды и насыщаемого сплава) при катодной плотности тока 0,085 А/см^2 в течение 10 мин (первый этап). Затем плавно снижают силу тока в цепи электролиза в течение 1,5÷2 ч до нуля.

При борировании стали 45 предлагаемым способом в течение 2 ч глубина боридного слоя достигает 120÷125 мкм. Его состав: 90 % Fe_2B и 10 % FeB. При этом улучшается чистота поверхности, повышается сопротивляемость разрушению под действием динамических нагрузок в результате уменьшения содержания высокобористой фазы.

На рис. 3, *а*—*в* показаны микроструктуры боридного слоя и переходной зоны на стали 45.

Строение боридного покрытия определяется химическим составом базового материала, режимами насыщения и типом борсодержащей насыщающей среды. Покрытие можно представить упрощенно, как несколько слоев, состоящих из FeB и Fe_2B, борида Fe_2B и борного цементита $Fe_{30}B_3C_2$, расположенного в диффузионной зоне [8].

Температура влияет на структуру основного борида. Ее повышение приводит к возникновению пор, расположенных ближе к поверхности. С увеличением температуры и времени насыщения наблюдается увеличение числа фазы FeB в пленке. При этом возможно образование в покрытии эвтектики, которая снижает износостойкость.

Наибольшее влияние на строение боридного слоя оказывают такие химические элементы, как Mo и Al. При этом игла боридов образует типичное дендритное строение, понижается общая глубина покрытия, существенно увеличивается пористость. Химические элементы W, Mo, Cr, снижающие скорость диффузии бора, значительно повышают число фазы FeB в пленке, а Al и Cr снижают ее объемное содержание [8, 9].

Основными факторами, влияющими на толщину боридного слоя, являются химический состав стали, тип насыщающей бор-

Ve618.fm Page 63 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

содержащей среды и режимы насыщения. Химические элементы Ti, Cr, V уменьшают толщину покрытия, Ni и Cu влияют незначительно, Mo и W уменьшают толщину диффузионного слоя, увеличение содержания углерода значительно уменьшает толщину борированной пленки [8].

Известно, что борирование начинается при температуре 800 °С. Увеличение температуры до 920÷950 °С существенно повышает толщину пленки, практически не изменяя ее строения. Дальнейшее повышение температуры ухудшает структуру основного материала.

Влияние продолжительности $\tau_н$ насыщения аналогично влиянию температуры: глубина слоя растет с повышением концентрации углерода и легирующих химических элементов в стали, влияние времени выдержки на толщину покрытия ослабевает. При $\tau_н$ = 2÷3 ч наблюдается оптимальное сочетание FeB и Fe_2B в боридном слое. Продолжительная выдержка ($\tau_н$ > 8 ч) электролиза приводит к образованию на поверхности покрытий хрупкой фазы FeB, что снижает сопротивление изнашиванию. Износостойкость борированных покрытий зависит не столько от его глубины, сколько от состава его структуры. Для щадящих режимов эксплуатации однофазные и двухфазные боридные покрытия имеют близкие показатели по износостойкости.

С увеличением контактных нагрузок повышается изнашивание хрупкой фазы FeB, которое тем больше, чем больше растягивающее напряжение в слое.

Оптимальная толщина покрытий зависит от действующих нагрузок. Для низколегированных сталей рекомендуемая толщина 80÷120 мкм, при бóльших толщинах покрытия склонны к трещинообразованию. Для высоколегированных сталей толщина покрытий должна составлять 30÷40 мкм, при бóльших значениях из-за значительных внутренних напряжений происходит отшелушивание и растрескивание.

Для борированных покрытий важным показателем является поверхностная твердость, которая может составлять до 30 ГПа, т. е. их твердость значительно выше, чем твердость слоев на основе углерода и азота. Причем теплостойкость композитов FeB + Fe_2B, как правило, выше и зависит от режимов насыщения [8, 9].

У всех боридных фаз высокий модуль упругости, так, для Fe_2B он составляет 54 ГПа. Минимальное критическое скалывающее напряжение составляет ≈0,1 модуля сдвига, что указывает на значительное сопротивление боридных фаз пластической деформации при трении скольжения [8].

Исследования распределений внутренних напряжений [11] в слое боридов показали, что на его поверхности возникают напряжения сжатия, достигающие 300 МПа, а на глубине 50 мкм возникают сжимающие напряжения до 100 МПа, которые в борированном слое уравновешиваются высокими (до 500 МПа) растягивающими напряжениями, локализующимися в тонком слое, расположенном непосредственно под борированным слоем.

Закалка для повышения твердости подслоя вызывает перераспределение растягивающих напряжений как в борированном слое, так и непосредственно под ним, что снижает сопротивление усталости. При закалке нагревание осуществляют в соляных ваннах или в защитной среде, а охлаждение — в селитровых или щелочных ваннах при температуре, обеспечивающей образование преимущественно трооститной структуры.

Разработан способ увеличения толщины боридного покрытия и его износостойкость (а. с. 773140 СССР). Через 8—10 мин после начала электролиза при температуре 900 °С в расплавленную среду вводят дополнительный электрод, подсоединив к нему отрицательный полюс от дополнительного источника тока, а положительный — к насыщаемым изделиям. Поляризуют деталь (анод) и плавно повышают плотность тока на детали до 0,07 А/см^2.

Электролиты, содержащие только буру и фтористый натрий, позволяют осуществлять борирование при температурах 700÷800 °С. Снижение температуры борирования при улучшении качества диффузионного слоя обеспечивается в электролите при температуре 700÷800 °С. Снижение температуры борирования при улучшении качества диффузионного слоя обеспечивается в электролите при следующих компонентах: 5÷10 % фтористого натрия, 30÷40 % бура, остальное фторборатнатрия. При введении фтороборага натрия в электролит изменяется строение расплавленной смеси.

Концентрация громоздких катионных и анионных группировок уменьшается в результате ионизации расплава. Это снижает температуру плавления среды для борирования с 694 до 400 °С. Следовательно, диффузионное насыщение можно осуществлять при температурах 500÷600 °С. Электролит готовят следующим образом. Смесь из 10 % фтористого натрия и 40 % буры плавят в графитовом тигле. В расплав вводят 50 % фторобората натрия. При борировании в этом электролите, например, быстрорежущей стали Р18 при температуре 560 °С и плотности катодного тока 0,1 А/см^2 в течение 1 ч на поверхности формируется покрытие глубиной до 20 мкм с твердостью до 19 ГПа.

Еще одним недостатком электролизного борирования является неравномерное насыщение поверхности вследствие повышенной вязкости расплава и его чрезвычайно медленного переме-

Ve618.fm Page 64 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

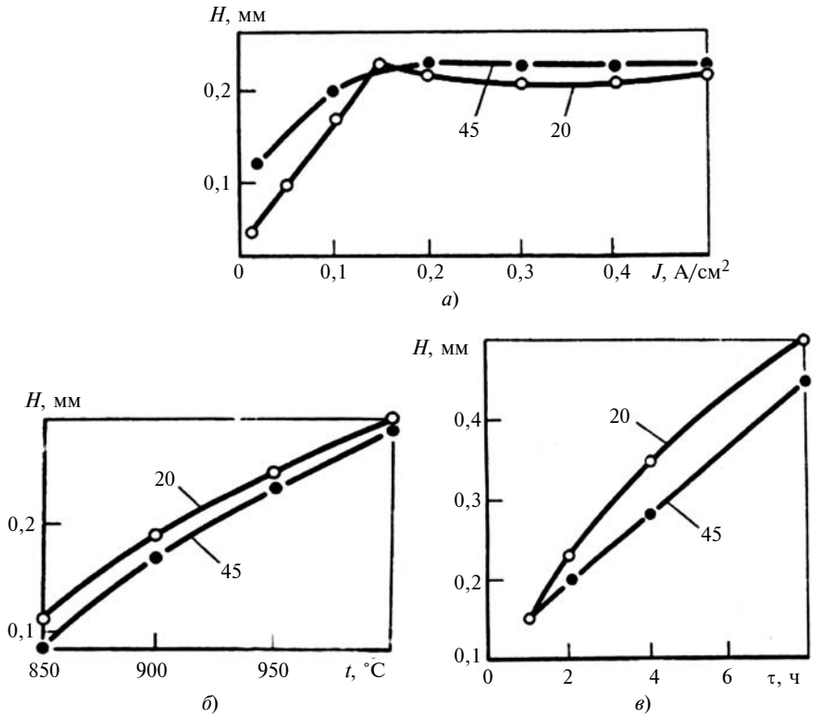


Рис. 4. Зависимости глубины *H* борированного слоя от плотности тока *J* при *t* = 950 °С и τ = 3 ч (*а*), температуры при *J* = 0,15 А/см^2 и τ = 3 ч (*б*), времени борирования при *J* = 0,15 А/см^2 и *t* = 950 °С (*в*) при электролизном борировании сталей 20 и 45

шивания. Образующийся борированнный слой имеет разную толщину на поверхности изделия и склонен к местному растрескиванию и шелушению. В местах отшелушивания от поверхностности отделяются мелкие частицы, что снижает износостойкость поверхности. Кроме того, остывающая бура налипает толстым слоем на изделия. Удалять ее можно кипячением в воде в течение 1,5÷2 ч. Под слоем буры находится слой порошка бора, налипшего на поверхность изделия, который удаляют металлическими щетками вручную или с помощью кварцевальных машин. Все это обусловливает необходимость в уменьшении вязкости расплава. Можно к буре добавить до 25 % подсушенной поваренной соли. Тогда налипающий при остывании слой буры уменьшается и быстрее растворяется в кипятке. Это улучшает равномерность борированного слоя, но недостаточно для получения ровного сплошного борированного слоя.

В настоящей работе проведены исследования по влиянию катодной плотности тока, температуры и продолжительности τ насыщения на глубину борированного слоя (рис. 4, *а*—*в*).

Оптимальная катодная плотность тока 0,15÷0,2 А/см^2. При борировании деталей с большой поверхностью плотность тока можно уменьшить до 0,05 А/см^2. Оптимальная температура расплава при борировании деталей из конструкционной среднелегированной стали 930÷950 °С. Борирование при этой температуре в течение 2,5÷3,5 ч обеспечивает получение слоя глубиной 0,12÷0,25 мм. Стремиться получить борированный слой глубиной более 0,25 мм не следует из-за повышения хрупкости, которая приводит к сколам слоя при последующей термообработке. Для низкоуглеродистой стали допустимая глубина слоя составляет 0,3 мм, для среднеуглеродистых сталей — 0,25 мм, для высокоуглеродистых — 0,18÷0,20 мм.

На металлургических комбинатах электролизному борированию подвергают такие детали, как направляющие ролики, траки и ролики башмака трубосварочного стана, втулки, пальцы, звездочки, оправки холодного волочения труб, проводки прокатных станов, пластины огнеупорных пресс-форм, уплотнительные пластины паллет агломашин и др.

Перед борированием поверхность деталей необходимо очищать от масла, окалины и других загрязнений. На некоторых предприятиях в качестве предварительной операции применяют электрохимическую полировку в ванне следующего состава: 72 % H_3PO_4, 8 % Cr_2O_3, 20 % H_2SO_4. Продолжительность проливки 10÷14 мин при плотности тока 0,08 А/см^2 (катод — свинцовые пластины, анод — деталь). После борирования детали очищают от шлама, снижающего качество последующей термообработки.

Для предотвращения хрупких разрушений борированных деталей необходима термическая обработка, которая способствует измельчению зерен, уменьшению неоднородности переходной зоны и изменяет распределение напряжений по сечению детали.

С учетом практики предприятий центрального Черноземного региона можно рекомендовать следующее:

1. Детали для борирования подвергать отпуску при температуре 650 °С; для деталей из низкоуглеродистых сталей можно использовать нормализацию.

2. Детали, работающие в условиях интенсивного изнашивания при давлении на трущиеся поверхности больше 980 Н/мм^2 и одновременном воздействии статических и ударных нагрузок, необходимо после отпуска подвер-

Ve618.fm Page 65 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

гать упрочняющей термической обработке — объемной или поверхностной закалке, обеспечивающей повышение твердости сердцевины или послойной зоны глубиной больше 1,5 мм до твердости, превышающей 400 *HB*.

3. Нагревание под закалку в камерных печах нежелательно из-за окисления и растрескивания борированного слоя.

4. Оптимальной является изотермическая объемная закалка с нагреванием в соляной ванне и охлаждением в щелочи; поверхностную закалку на глубину 2,0÷2,5 мм можно выполнять с помощью лампового или машинного генератора токов высокой частоты, при закалке на глубину более 2,5 мм используют машинный генератор. Последующий отпуск желателен при температуре 250 °С.

На Новолипецком заводе сотрудниками Днепропетровского ГУ разработано циклическое электролизное борирование, представляющее собой чередование выдержки при включенном на 0,5÷3 мин и выключенном на 10÷15 мин токе электролиза. Данное борирование снижает энергозатраты и повышает производительность процесса.

Детали металлургического оборудования: ролики привалковой арматуры, проводки (пропуска) сортовых станов, плунжеры, валы, муфта и т. п. из сталей 30, 45 и пр. подвергают твердофазному борированию в порошках. Последовательность операций:

1) подготовка насыщающей смеси (перемешивание компонентов смеси и удаление влаги);

2) обезжиривание поверхности деталей;

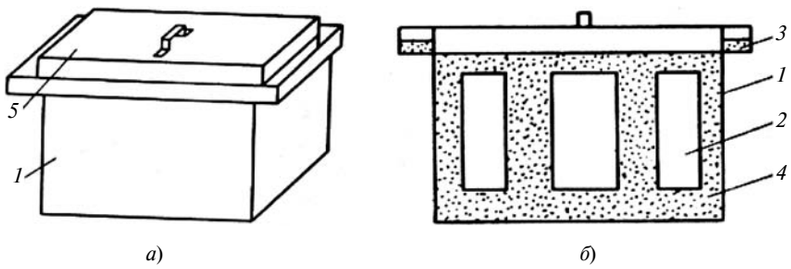
3) упаковка деталей в контейнер;

4) борирование (нагревание и выдержка в печи);

5) распаковка контейнера;

6) термообработка деталей: с температуры борирования; повторное нагревание в печи под закалку в среде защитного газа; закалка с нагреванием ТВЧ;

7) очистка борированных деталей.



а) *б*)

Рис. 5. Контейнер (*а*) и схема упаковки деталей (*б*):
1 — контейнер; *2* — места закладки деталей; *3* — натрий-силикатное стекло; *4* — борсодержащий порошок; *5* — крышка

На Новолипецком металлургическом комбинате борирование осуществляют в смеси: 95 % карбида бора, 5 % фтористого натрия. Карбид бора прокаливают при температуре 350÷450 °С в течение 1,5 ч; обезжиривают детали в моечной машине в 5÷10 %-м водном растворе Na_2CO_3 при температуре 80÷90 °С в течение 30 мин.

Борирование в порошках осуществляют в специальных герметически закрытых контейнерах (рис. 5, *а*, *б*) с плавким затвором (крошка натрий силикатного стекла). Нагревание выполняют в электрических камерных печах СНЗ: посадка контейнера с деталями в печь при температуре 700 ± 10 °С, нагревание до температуры 950 ± 10 °С, выдержка в течение 6 ч.

Термическую обработку борированных деталей можно осуществлять тремя способами:

а) выгруженные из печи контейнеры распаковывают, детали остужают до температуры 850÷870 °С, охлаждают в воде (масле), промывают в моечной машине и подвергают отпуску при температуре 200 °С в течение 2,5 ч;

б) выгруженный контейнер охлаждают на воздухе, распаковывают, детали после промывания нагревают под закалку до температуры 850÷870 °С, закаливают в воде (масле), промывают в моечной машине и подвергают отпуску;

в) детали после охлаждения в контейнере промывают, нагревают ТВЧ и подвергают закалке. Затем детали подвергают отпуску при температуре 200 ± 10 °С.

После нагревания в печи глубина борированного слоя составляет 0,15÷0,3 мм, а микротвердость — $(15÷20) \cdot 10^3$ МПа. После нагревания ТВЧ глубина борированного слоя составляет 0,15÷0,3 мм, глубина закаленного слоя — до 5 мм, микротвердость борированного слоя — 15 600÷17 800 МПа. Данный способ позволяет снизить трудоемкость, улучшить качество обработки, снизить расходы материалов и энергоносителей.

Борированию в порошковой смеси подвергали чугунные проводки (химический состав чугуна: 3,6 % С; 1,47 % Si; 0,7 Mn). После борирования при температуре 950 ± 10 °С в течение 6÷10 ч был получен слой глубиной 0,3÷0,4 мм. При этом износостойкость поверхностей повысилась в 1,3—1,8 раза.

Применение обмазок (паст) позволяет при упрочнении одинаковых деталей на 25 % снизить расход карбида бора по сравнению с расходом при борировании в порошках. Подробное применение борсодержащих обмазок рассмотрено в других работах.

Ve618.fm Page 66 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Технологический процесс борирования обмазками состоит из следующих этапов: 1) подготовка деталей (очистка поверхности, обезжиривание); 2) подготовка пасты к нанесению ее на детали; 3) просушка деталей с пастой при температуре 180÷200 °С в течение 1,5÷2 ч; 4) борирование при температуре 950 ± 10 °С в течение 6÷8 ч; 5) подстуживание на воздухе до температуры 850 °С; 6) закалка деталей в воде (масле); 7) отпуск при температуре 180÷200 °С в течение 2 ч. В случае неполного удаления пасты с поверхности при закалке детали промывают в кипящей воде в течение 1,5÷2 ч.

Важным является применение связующего. При борировании горизонтальных поверхностей в качестве связующего применяют воду, а при применении обмазок на вертикальных или наклонных плоскостях — гидролизированный этилсиликат [25, 26]. Применение в качестве связующего бентонита (монтмориллонита — $Al_2O_3 + 4SiO_2 + H_2O + nH_2O$, до 4 % $Fe_{общ}$ + Ti; ГОСТ 28177—89) показал его высокую эффективность и технологичность. Состав пасты может быть разным: 1) 84 % B_4C; 6 % NaF; 10 % бентонита; 2) 66 % B_4C; 16 % бура; 8 % NaF; 10 % бентонита; 3) 55 % B_4C; 30 % бура; 5 % NaF; 10 % бентонита.

Борирование в порошковой смеси и обмазка позволяют применять многокомпонентное насыщение поверхностей деталей. Виды композиций: бор + медь, бор + хром, бор + кремний, бор + алюминий и др. Установлено, что диффузионные комплексные покрытия значительно улучшают эксплуатационные свойства деталей.

На Новолипецком металлургическом комбинате бороалитированием были обработаны штуцеры (сталь 20) фурм системы вдувания пылеугольного топлива, работающие в условиях высоких температур и абразивного изнашивания. Состав смеси: 25 % B_4C + 30 % Al (порошок) + 40 % Al_2O_3 + 5 % NaF. Предварительные испытания показали, что при температуре 100 °С за 20 ч масса штуцеров, прошедших бороалитирование, уменьшается в 1,3 раза меньше, чем борированных, и в 1,6 раза меньше, чем неупрочненных.

Представленные в настоящей статье результаты исследований не противоречат данным, приведенным в работах [1, 2, 4, 6, 7, 12].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Лабунец Н. Ф., Ворошнин Л. Г., Киндраук М. В.** Износостойкие боридные покрытия. Киев: Техника, 1989. 253 с.

2. **Широков В. В., Васильев Х. Б., Арендар Л. А.** Борирование сплавов системы Fe—C и его особенности // ВИСН. Двигателестроение. 2004. № 3. С. 138—142.

3. **Алиев А. А., Булгаков В. П., Приходько Б. С.** Диффузионное борирование стали и шероховатость поверхности // Вестник Астраханского ГТУ. 2005. № 2. С. 91—94.

4. **Исследование** в доэвтектоидных сталях фазового состава методом мессбауровской спектроскопии / В. Н. Гадалов, С. Г. Емельянов, Д. Н. Романченко и др. // Успехи современного естествознания. 2010. № 3. С. 118— 120.

5. **Денисюк А. К., Загуляева С. В., Потуткина Е. Н.** Структура борированных слоев в углеродистых сталях // СТИН. 2010. № 11. С. 39—40.

6. **Гадалов В. Н.** Физико-механические, эксплуатационные и релаксационные свойства конструкционных сталей с боридными, цианированными и гальваническими покрытиями // Механика композиционных материалов и конструкций. 2011. Т. 17. № 4. С. 592—598.

7. **Лыгденов Б. Д., Мосоров В. И., Мижитов А. Ц.** Исследования фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 45 и 5ХНВ // Вестник Восточно-Сибирского ГТУ. 2011. № 1. С. 25—31.

8. **Бирюков В. П.** Изменение свойств борсодержащих покрытий под воздействием лазерным лучом // Вестник машиностроения. 2012. № 1. С. 64—67.

9. **Диффузионные** боридные покрытия на железе, сталях и сплавах / В. Н. Гадалов, А. С. Борсяков, В. Г. Сальников и др. М.; Курск: Наука, 2012. 146 с.

10. **Особенности** структуры и свойств боридных диффузионных слоев, оптимизация технологии их получения / В. Н. Гадалов, А. С. Борсяков, В. Г. Сальников и др. // Изв. ЮЗГУ. Сер. Техника и технология. 2012. № 2 (41). С. 73—77.

11. **Применение** электролизного борирования для упрочнения деталей при изготовлении силикатного кирпича / В. Н. Гадалов, Е. В. Иванова, В. Г. Сальников и др. // Мат. совещания "Инновационное направление учеб.-метод. и науч. деятельностей кафедр материаловедения и технологий конструкционных материалов". Саранск: Мордовский ун-т, 2012. С. 40—43.

12. **Термодинамические** расчеты реакций при электролизном насыщении металлов бором из расплава буры / В. Г. Сальников, В. Н. Гадалов, А. С. Борсяков и др. // Мат. совещания "Инновационное направление учеб.-метод. и науч. деятельностей кафедр материаловедения и технологий конструкционных материалов". Саранск: Мордовский ун-т, 2012. С. 86—91.

13. **Боридные** покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники: получение, структура и износостойкость в реальных условиях / А. В. Ишков, В. В. Иванайский, Д. В. Коваль и др. // Тр. ГОСНИТИ. 2012. Т. 109. Ч. 2. С. 124—131.

14. **Гадалов В. Н., Петренко В. Р., Ляхов А. В.** Химико-термическая и электрофизическая обработка сплавов и покрытий // Verlag. Германия. 2016. 250 с.

15. **Исследование** напряженного состояния в поверхностных слоях доэвтектоидной стали после электролизного борирования / В. Н. Гадалов, А. В. Филонович, А. Г. Беседин и др. // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 2. С. 12—16.

16. **Повышение** долговечности деталей тяговых цепей конвейеров из конструкционных сталей электролизным борированием / В. Н. Гадалов, А. В. Филонович, А. С. Бореяков и др. // Сб. статей 2-й междунар. НПК "Перспективы развития технологий и обработки в машиностроении" Курск: ЮЗГУ, Университетская книга, 2017. С. 64—72.

Ve618.fm Page 67 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.9.04

А. Ю. АЛБАГАЧИЕВ, д-р техн. наук (Московский технологический университет, ИМАШ РАН), А. С. КРАСКО, Н. С. БАРАНОВА, Е. С. СТРАМЦОВА, А. А. МОКАНУ (МТУ), e-mail: albagachiev@yandex.ru

Перспективы применения электронно-лучевой плавки при изготовлении деталей газотурбинных двигателей

Рассмотрены перспективы применения аддитивных технологий с целью сокращения трудоемкости изготовления деталей газотурбинных двигателей. Исследована целесообразность использования электронно-лучевой плавки при изготовлении моноколеса.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электронно-лучевая плавка, газотурбинный двигатель, моноколесо.

The prospects of application of additive technologies with the purpose of labor input reduction of manufacturing of gas turbine engines parts are considered.

The expediency of using electron-beam melting in the manufacture of mono-wheel is studied.

Keywords: additive technologies, electron beam melting, gas turbine engine, mono-wheel.

В последние годы в России наблюдается подъем в авиационном двигателестроении, что связано с решением поставленных задач по импортозамещению, т. е. с освоением производства узлов, ранее производившихся за рубежом и, в частности, на Украине. Так, в 2016 г. Объединенная двигателестроительная корпорация (ОДК), входящая в "Ростех", заменила украинские комплектующие газотурбинных двигателей АИ-222-25 для учебно-боевого самолета Як-130 на комплектующие российского производства. Ожидается увеличение объема производства, связанное с разработками двигателей нового поколения, что было заявлено генеральным директором ОДК Владиславом Масаловым в 2015 г. на международной выставке Aero India.

К новым разработкам относится и двигатель АЛ-55И, предназначенный для первого индийского учебно-тренировочного самолета. Ведутся работы по созданию двигателя ТВ7-117СТ для нового транспортного самолета Ил-112В, первый полет которого планируется в 2018 г. В этом же году планируется запуск серийного производства двигателя ПД-14, используемого в авиалайнере МС-21, летающей лаборатории Ил-76ЛЛ и Sukhoi Superjet 100. На завершающем этапе испытаний находится истребитель пятого поколения Су-57 (ПАК ФА), серийное производство которого намечено на 2018—2019 гг. [1].

Все это указывает на то, что в ближайшее время существенно увеличится выпуск газотурбинных двигателей, а соответственно и их деталей, изготовляемых из труднообрабатываемых материалов. Особенно трудоемкими являются такие элементы, как моноколесо и лопатка из титанового и жаропрочного сплавов. Время механической обработки моноколеса из титанового сплава ВТ-6 (рис. 1) диаметром 600 мм составляет 79,5 ч, при этом на фрезерование лопаток уходит 56 ч. Намеченное увеличение объемов производства и номенклатуры приведет к необходимости увеличения производственных мощностей и потребует значительные капиталовложения на специализированное дорогостоящее оборудование.

С учетом этого представляется целесообразным снижение трудоемкости изготовления данных деталей путем внедрения прогрессивных способов изготовления и обработки, а также организации рационального производства. Последнее основывается на концепции бережливого производства и повышении степени его автоматизации. Этого можно добиться, например, сокращением времени пребывания детали на этапе незавершенного производства. Для изготовления такой детали, как моноколесо рационально применять гибкие производственные модули с накопителями, позволяющими вести непрерывную обработку деталей, используя трехсменный режим работы на предприятии.

К прогрессивным видам обработки относятся плунжерное и высокоскоростное фрезерование, позволяющие сократить трудоемкость обработки лопаток колеса на 20÷40 %.

Данные методы уже нашли применение на российских двигателестроительных предприятиях. Наиболее перспективным способом снижения трудоемкости обработки является применение аддитивных технологий. На Всемирном фестивале молодежи и студентов в г. Сочи Юрий Шмотин (генеральный конструктор ОДК) отметил, что ключевым направлением развития конкурентоспособного двигателестроения является применение

Рис. 1. Моноколесо

Ve618.fm Page 68 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

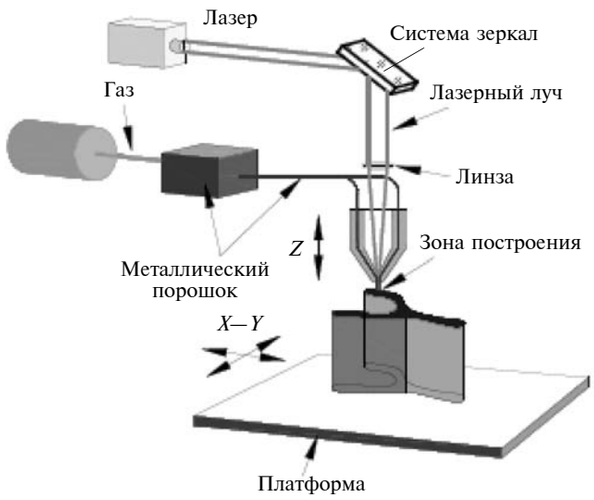


Рис. 2. Схема электронно-лучевой плавки

аддитивных технологий [2], которые позволяют использовать перспективные высокотемпературные композитные материалы и сокращают общее число деталей в конструкции. В некоторых случаях применение аддитивных технологий позволяет 200 деталей заменить десятью деталями, а следовательно, сэкономить на оснастке и сократить время изготовления [3].

Аддитивные технологии (Additive Manufacturing, Additive Fabrication, или AM- и AF-technologies) предполагают изготовление (построение) физической детали методом добавления материала в отличие от традиционных методов формообразования детали путем удаления части материала из заготовки. Особое внимание для аэрокосмической отрасли представляет технология Direct Metal Fabrication (DMF), т. е. так называемое выращивание детали из металла [4]. Для этого применяют две технологии: селективное лазерное спекание (Direct metal laser sintering) и электронно-лучевую плавку (ЭЛП) — Electron Beam Melting (EBM).

Селективное лазерное спекание применяют при создании целой детали или небольших деталей сложной формы, например, лопаток турбины с сетью внутренних каналов для охлаждающей жидкости, что невозможно получить механической обработкой. При этом есть ряд ограничений и недостатков, основными из которых являются низкая производительность и ограничения по размерам детали, обусловленные размерами рабочей камеры.

Электронно-лучевая плавка позволяет выращивать деталь практически любых размеров, так как можно не выращивать всю деталь, а лишь наплавлять ту ее часть, которая является наиболее трудоемкой при механической обработке. Данная технология заключается в том, что расплавленный материал подают в те места, куда в данный момент подведена энергия, под действием которой происходит непосредственное осаждение металлического порошка, т. е. строится фрагмент детали.

Использование электрических пучков в вакуумной камере обеспечивает наибольшую детализацию создаваемого объекта. Корректировка электронного луча осуществляется изменениями магнитных полей. Схема данного процесса показана на рис. 2.

Исследования показали, что физико-механические свойства полученных данным способом деталей соответствуют и даже превосходят свойства аналогичных деталей, полученных традиционными способами.

Рассмотрим применение данного способа при изготовлении моноколеса из титанового сплава ВТ-6 диаметром 600 мм и массой 14 кг с целью снижения трудоемкости и объемов его обработки. В качестве заготовки использовали штампованную поковку диаметром 700 мм массой 124 кг. При изготовлении данной детали коэффициент использования материала составляет 0,11. Большая часть механической обработки приходится на фрезерование межлопаточного пространства, на которую затрачивается 56 ч, общее время механической обработки составляет 79,5 ч [5].

Снизить трудоемкость изготовления детали можно, заменив обработку фрезерованием на наращивание лопаток на предварительно обработанном основании с помощью ЭЛП. При этом масса заготовки снижается до 24 кг, а коэффициент использованного материала повышается до 0,58.

Наплавлять лопатки из титанового сплава можно только в среде защитного газа. Лопатки имеют сложную форму и для их формообразования необходимо обеспечить перемещение по пяти координатам. Это накладывает ограничение на используемое оборудование. Проблему можно решить с помощью трехмерных промышленных принтеров серии MX компании InssTek. Данное оборудование управляется УЧПУ и встраивается в автоматизированную систему.

После наплавления лопаток необходимо осуществить чистовое фрезерование, поэтому итоговый коэффициент использования материала составляет 0,5 (таблица).

Продолжительность этапов изготовления моноколеса при разных технологиях, мин

Этап изготовления	Фрезерование	ЭЛП
Черновая обработка межлопаточного паза (плунжерное фрезерование)	3360	—
Наплавление лопаток	—	380
Получистовая обработка лопаток	1290	998
Чистовая обработка лопаток	120	120
Всего	**4770**	**1498**
Коэффициент использования материала	**0,11**	**0,50**

Ve618.fm Page 69 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.9.048.6

Н. К. ТОЛОЧКО, д-р физ.-мат. наук, А. Н. ЧЕЛЕДИНОВ (Белорусский ГАТУ, г. Минск), e-mail: n.tolochko@hotmail.com

Кинетические закономерности ультразвуковой очистки деталей машин от загрязнений

Экспериментальными и теоретическими исследованиями кинетики ультразвуковой очистки установлено, что неравномерное удаление загрязнения во времени обусловлено неоднородностью его структуры по толщине слоя, а также изменением активности кавитации в результате накопления фрагментов загрязнения в моющей жидкости.

Ключевые слова: ультразвук, поверхность, загрязнение, очистка, кинетика, кавитация.

By the experimental and theoretical researches of the kinetics of ultrasonic cleaning it is determined, that the uneven removal of contamination over time is due to the heterogeneity of its structure over the layer thickness, as well as to changes in the cavitation activity resulting from the accumulation of contamination fragments in the washing liquid.

Keywords: ultrasound, surface, contamination, cleaning, kinetics, cavitation.

Ультразвуковая (УЗ) очистка деталей от загрязнений широко применяется при производстве, ремонте и техническом обслуживании машин. Загрязнения удаляются воздействием акустической кавитации, возникающей в моющей жидкости. Качество УЗ очистки, т. е. количество загрязнений, оставшихся на деталях после завершения очистки, зависит от разных факторов, в основном от ее длительности [1]. Поэтому практический интерес представляет изучение особенностей зависимости качества УЗ очистки от ее длительности. В ряде экспериментальных исследований показано, что эта зависимость имеет нелинейный характер: сначала очистка идет сравнительно быстро, а далее замедляется [1—5]. Причины неравномерной УЗ очистки до сих пор не определены. Предполагается, в частности, что они могут быть связаны с неоднородностью структуры по толщине слоя загрязнения: нижняя часть слоя, прилегающая к поверхности детали, более плотная и прочная, поэтому меньше поддается удалению [2, 5]. Однако это предположение не имеет достаточно убедительного экспериментального подтверждения.

Данная статья посвящена экспериментальному исследованию кинетических закономерностей УЗ очистки деталей от загрязнений. Исследовали очистку модельных загрязнений как с неоднородной, так и с однородной структурами по толщине слоя.

Очистку проводили с помощью УЗ диспергатора (производство БГУИР, Беларусь), работающего на частоте 22 кГц при выходной мощности 38 Вт. Волновод-концентратор диспергатора, выполненный из титана в форме конуса, погружали в цилиндрический стеклянный сосуд ∅35 мм, заполненный на 70 мм моющей жидкостью — водой с температурой 20 °С (специальные моющие средства не использовали). На дне сосуда размещали пластмассовую платформу толщиной 5 мм с нанесенным на нее загрязнением. Платформа покрывала почти все дно сосуда. Волновод устанавливали так, чтобы излучающий диск (∅15 мм, толщина 2 мм) на его выходном торце находился в центральной части объема жидкости на расстоянии 28 мм от платформы.

Наносимые загрязнения состояли из смеси глины и моторного масла 10W-40. Они имитировали наиболее распространенные масляно-грязевые загрязнения, которые покрывают наружные поверхности деталей транспортных и сельскохозяйственных машин в условиях эксплуатации. На

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 67)

Таким образом, теоретическое исследование показало, что аддитивные технологии значительно сокращают трудоемкость изготовления сложнопрофильных деталей, особенно из труднообрабатываемых материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **www.salut.ru.** АО "НПЦ газотурбостроения "Салют".

2. **Объединенная** двигателестроительная корпорация. http://www.uecrus.com/rus/presscenter/odk_news/?ELEMENT_ID=2782]

3. **Национальный** авиационный портал. http://www.kr-media.ru/news/dvigatelestroenie/genkonstruktor-odk-poznakomil-uchastnikov-vsemirnogo-festivalya-molodezhi-i-studentov-s-klyuchevymi-/

4. **Зленко А. А., Нагайцев М. В., Добрыш В. М.** Аддитивные технологии в машиностроении: Пособие для инженеров. 2015. М.: НАМИ, 220 с.

5. **Краско А. С., Баранова Н. С., Мокану А. А.** Сокращение трудоемкости изготовления деталей типа "блиск" за счет применения технологии электронно-лучевой плавки // Мат. междунар. науч.-техн. конф. "Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике". Вып. XXIII. М.: Московский технологический университет, Физико-технологический институт, 2017. С. 236—238.

Ve618.fm Page 70 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

практике толщина таких покрытий может составлять до 10 мм [6]. При выполнении экспериментов загрязнения наносили на центральную часть платформы слоями в виде диска ∅15 мм с помощью трафаретов из пластмассовых пластинок фиксированной толщины с круглым отверстием.

Во время УЗ очистки диспергатор периодически отключали, извлекали из воды платформу и измеряли среднюю толщину h слоя загрязнения с помощью мерной линейки и лупы с точностью 0,2 мм. Выполнили две серии сравнительных экспериментов.

В первой серии изучали особенности удаления слоя загрязнения с неоднородной по толщине структурой. Удаляемый слой состоял из трех прослоек разного состава, объемное соотношение глины и масла в которых составляло: в нижней — 2:1, в средней — 3:1, в верхней — 4:1. Таким образом, нижняя прослойка, непосредственно контактирующая с платформой, имела наименьшее содержание глины, верхняя прослойка, обращенная к излучателю, — наибольшее. Толщина каждой прослойки составляла 1 мм, а всего слоя — 3 мм. Результаты экспериментов приведены на рис. 1, кривая *1*, которая имеет ярко выраженный нелинейный характер, показывает, что загрязнение удаляется сначала сравнительно быстро, а затем все медленнее. На кривой можно выделить три почти линейных участка, каждый из которых соответствует удалению разных прослоек. Быстрее удаляется верхняя прослойка с бóльшим содержанием глины — за ≈40 с; средняя прослойка за ≈60 с, нижняя за 80 с.

Во второй серии изучали особенности удаления слоя загрязнения с однородной структурой по толщине. Эксперименты проводили с тремя разными по составу слоями с объемным соотношением глины и масла 2:1, 3:1 и 4:1, т. е. как и в первой серии экспериментов для отдельных прослоек с неоднородной структурой,

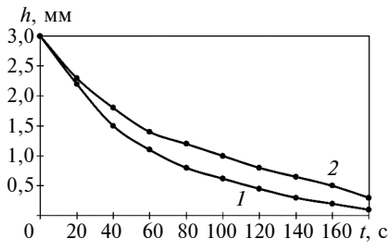


Рис. 1. Зависимости толщины h слоя загрязнения с неоднородной структурой от длительности t УЗ обработки в обычных условиях (*1*) и с прокачкой моющей жидкости (*2*)

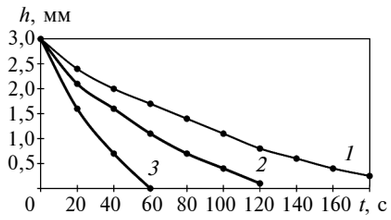


Рис. 2. Зависимости толщины h слоя загрязнения с однородной структурой от длительности t УЗ обработки в обычных условиях при объемном соотношении глины и масла в слое 2:1 (*1*), 3:1 (*2*) и 4:1 (*3*)

и толщиной каждого слоя 3 мм. Результаты экспериментов приведены на рис. 2 в виде кривых *1*, *2* и *3*, которые, как и кривая *1* на рис. 1, имеют нелинейный характер, т. е. сначала быстрое удаление загрязнения, которое далее замедляется. Однако нелинейность кривых на рис. 2 менее выражена, чем кривой *1* на рис. 1. Отметим также разную крутизну кривых, т. е. разную длительность удаления слоев: чем больше содержание глины, тем быстрее он удаляется.

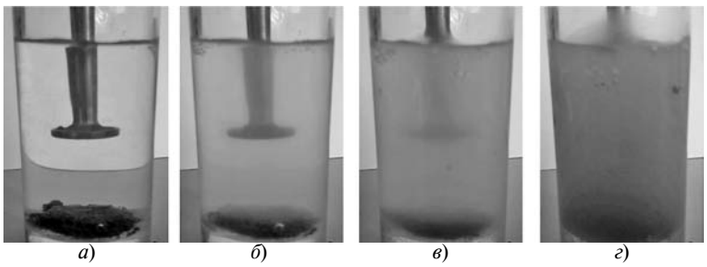
Как упоминалось выше, нелинейный характер зависимости $h(t)$ на рис. 1 (кривая *1*) может быть обусловлен неоднородной структурой слоя загрязнения. Поэтому для слоя загрязнения с однородной структурой следовало ожидать линейную зависимость $h(t)$, однако, как показали результаты экспериментов (см. рис. 2), она также имеет нелинейный характер. Это означает, что экспериментально наблюдаемое замедление удаления загрязнения может быть обусловлено не только неоднородной структурой слоя загрязнения по толщине, но и иными причинами.

По-видимому, эти причины могут быть связаны с изменениями состояния моющей жидкости во время УЗ очистки, оказывающими влияние на активность кавитации. В частности, такие изменения состояния моющей жидкости могут быть обусловлены появлением в ней мелкодисперсных фрагментов загрязнения — частиц глины и капель масла, которые отделяются от слоя загрязнения при его разрушении под действием кавитации. В результате моющая жидкость, в данном случае вода, превращается в комбинированную дисперсную систему — смесь суспензии и эмульсии. По мере разрушения слоя загрязнения концентрация и глины, и масла в воде увеличивается. Под действием кавитации фрагменты загрязнения, находясь в жидкости, подвергаются дополнительному диспергированию, а под действием акустических потоков они распространяются по объему жидкости. Изменение состояния моющей жидкости во время очистки показано на рис. 3: в соответствии с разными стадиями очистки меняется прозрачность жидкости.

Известно, что при распространении ультразвука в эмульсиях или суспензиях его интенсивность ослабевает при взаимодействии с частицами дисперсной фазы [7—9], что, соответственно, должно снижать активность кавитации, т. е. ее способность разрушать загрязнения [10]. Можно заключить, что наблюдаемое в экспериментах замедление УЗ очистки вызывается снижением активности кавитации в результате постепенного накопления мелкодисперсных фрагментов загрязнения в моющей жидкости.

Чтобы показать влияние содержания мелкодисперсных частиц в жидкости на активность кавитации, выполнили специальные эксперименты, в которых измеряли ее величину в воде с

Ve618.fm Page 71 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 3. Изменение прозрачности моющей жидкости с повышением содержания фрагментов удаляемого загрязнения при длительности УЗ обработки t = 0 (*а*), 20 (*б*), 40 (*в*) и 60 с (*г*)

разной концентрацией частиц глины. Активность a кавитации оценивали по среднему значению давления в зоне кавитации, измеряемому с помощью кавитометра ICA-4D-M (производство БГУИР, г. Минск). Измерительный щуп кавитометра погружали в воду так, чтобы он располагался над платформой на расстоянии ≈25 мм. Прибор измерял активность и захлопывающихся, и пульсирующих кавитационных пузырьков. Активность a кавитации измеряли в относительных единицах; об ее уровне судили по электрическому напряжению, которое указывалось на индикаторной шкале электронного блока кавитометра. При проведении экспериментов воду в сосуде обрабатывали ультразвуком по описанной выше методике. Обработку проводили в несколько стадий, на каждой стадии в воду (объем 100 мл) добавляли фиксированную дозу глины (2 г), после чего измеряли значение a. Результаты экспериментов (рис. 4) показали, что активность кавитации уменьшается почти по линейному закону с увеличением концентрации частиц загрязнения в жидкости. Это согласуется с известными результатами исследований затухания ультразвука в эмульсиях и суспензиях, свидетельствующими о линейном увеличении коэффициента затухания с концентрацией дисперсной фазы [7—9].

Для выяснения характера влияния содержания дисперсной фазы в воде на процесс УЗ очистки выполнили дополнительные эксперименты по удалению слоев загрязнения, которые имели как неоднородную, так и однородную структуру по толщине. Эти эксперименты в целом аналогичны описанным выше, но отличаются тем, что во время очистки в сосуд через шланг непрерывно под небольшим напором добавляли воду при температуре 20 °С. При этом излишки воды переливались через край сосуда, унося с собой мелкодисперсные фрагменты загрязнения, поэтому их содержание в сосуде во время очистки заметно уменьшалось.

Результаты экспериментов по удалению неоднородного слоя загрязнения в условиях прокачки моющей жидкости показаны кривой *2* на рис. 1. Видно, что кривая *2* менее крутая, чем кривая *1*.

Результаты экспериментов по удалению однородного слоя загрязнения (толщина 3 мм, соотношение глины и масла 3:1) в условиях прокачки моющей жидкости приведены на рис. 5 в виде зависимости $h(t)$, которая практически линейна (кривизна, которая может быть обусловлена небольшим содержанием в жидкости фрагментов загрязнения, незначительна).

Итак, результаты экспериментов показали, что в условиях прокачки моющей жидкости наличие фрагментов загрязнения в жидкости мало влияет на процесс УЗ очистки, ввиду их небольшой концентрации.

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить следующим.

Качество очистки поверхности оценивается толщиной h слоя загрязнения, не удаленного после очистки:

$$h = h_0 - vt, \qquad (1)$$

где h_0 — начальная толщина слоя загрязнения; v — скорость продвижения фронта разрушения загрязнения от поверхности слоя к поверхности детали; t — длительность очистки.

Скорость v тем больше, чем больше активность a кавитации и меньше кавитационная стойкость r загрязнения:

$$v = k_v \frac{a}{r}, \qquad (2)$$

где k_v — коэффициент.

Рассмотрим некоторые возможные варианты развития процесса очистки.

Вариант 1. Во время очистки значения r и a не изменяются. Это может иметь место, когда структура удаляемого слоя загрязнения однородна по толщине, а очистка проходит в проточной системе с достаточно интенсивной прокачкой моющей жидкости, благодаря чему фрагмен-

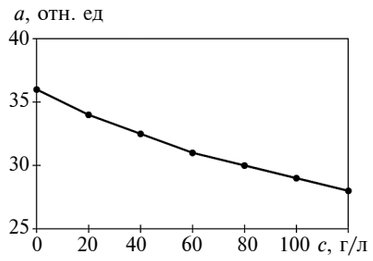


Рис. 4. Зависимость активности a кавитации от концентрации c глины в воде

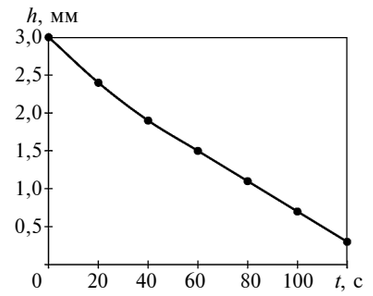


Рис. 5. Зависимость толщины h слоя загрязнения с однородной структурой от длительности t УЗ обработки с прокачкой моющей жидкости

Ve618.fm Page 72 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

ты разрушаемого загрязнения в жидкости полностью выносятся за пределы зоны обработки и не влияют на активность кавитации.

Тогда, подставив равенство (2) в равенство (1), получим выражение

$$h = h_0 - k_v \frac{a}{r} t, \qquad (3)$$

которое представляет собой кинетическое уравнение процесса очистки поверхности от слоя загрязнения с однородной по толщине структурой при постоянной активности кавитации. Зависимость $h(t)$ согласно выражению (3) — линейна: фронт разрушения слоя загрязнения продвигается равномерно во времени. Этому случаю соответствует экспериментальная зависимость $h(t)$ на рис. 5.

Вариант 2. Во время очистки значение r изменяется, а значение a остается неизменным. Это может иметь место, когда структура удаляемого слоя загрязнения неоднородна по толщине, а очистка проходит в проточной системе, как и в варианте 1.

Как отмечалось выше, значение r увеличивается, как правило, в направлении от поверхности слоя загрязнения к поверхности детали. Пусть по мере продвижения фронта разрушения загрязнения, т. е. по мере увеличения толщины $(h_0 - h)$ удаленного слоя загрязнения значение r увеличивается линейно:

$$r = r_0 + k_r(h_0 - h), \qquad (4)$$

где r_0 — кавитационная стойкость загрязнения на поверхности слоя; k_r — коэффициент.

Тогда с учетом уравнения (4) выражение (3) приобретет вид:

$$h = h_0 - \frac{k_v a}{r_0 + k_r(h_0 - h)} t. \qquad (5)$$

Преобразовав уравнение (5), получим квадратное уравнение

$$k_r h^2 - (2k_r h_0 + r_0)h + h_0 r_0 + \\ + k_r h_0^2 - k_v a t = 0,$$

которое имеет следующее решение (с учетом того, что h уменьшается с увеличением t):

$$h = h_0 + \frac{r_0}{2k_r} - \sqrt{\frac{r_0^2}{4k_r^2} + \frac{k_v a}{k_r} t}. \qquad (6)$$

Выражение (6) представляет собой кинетическое уравнение процесса очистки поверхности от слоя загрязнения с равномерно-неоднородной по толщине структурой при постоянной активности кавитации. Зависимость $h(t)$ согласно уравнению (6) нелинейная: фронт разрушения слоя загрязнения со временем продвигается все медленнее, что обусловлено увеличением кавитационной стойкости загрязнения по толщине слоя (от поверхности слоя к поверхности детали). Этому случаю соответствует экспериментальная зависимость $h(t)$ на рис. 1 (кривая *2*) (слой загрязнения характеризуется линейно-ступенчатым изменением структуры по толщине).

Преобразуем выражение (6) следующим образом:

$$h = h_0 + A - \sqrt{A^2 + Bt}, \qquad (7)$$

где $A = r_0/(2k_r)$ и $B = k_v a/k_r$.

Уравнение (7) описывает кривую *2* на рис. 1 при $A = 0{,}29$ и $B = 0{,}049$ и имеет вид:

$$h = h_0 + 0{,}29 - \sqrt{0{,}0841 + 0{,}049t}$$

(здесь согласно условиям экспериментов $h_0 = 3$ мм).

Вариант 3. Во время очистки значение r остается неизменным, а значение a изменяется. Это может иметь место, когда структура удаляемого слоя загрязнения однородна по толщине, а очистка проходит в замкнутой (непроточной) системе, в результате чего фрагменты разрушаемого загрязнения способны влиять на активность кавитации.

Пусть активность a уменьшается линейно по мере увеличения концентрации c фрагментов загрязнения в моющей жидкости (согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 4):

$$a = a_0 - k_a c, \qquad (8)$$

где a_0 — активность кавитации в начальный момент очистки, когда в моющей жидкости отсутствуют фрагменты загрязнения; k_a — коэффициент.

Значение c увеличивается по мере увеличения толщины $(h_0 - h)$ удаленного слоя загрязнения. При этом с увеличением значения c активность a снижается, что в свою очередь замедляет увеличение толщины удаленного слоя и, соответственно, замедляет увеличение c. Такой характер изменения концентрации c можно описать выражением, подобным уравнению равнозамедленного движения:

$$c = k_c(h_0 - h) - \frac{k_c^*(h_0 - h)^2}{2}, \qquad (9)$$

где k_c и k_c^* — коэффициенты.

Преобразовав выражение (3) с учетом уравнений (8) и (9), получим кинетическое уравнение процесса очистки поверхности от слоя загрязнения с однородной по толщине структурой в условиях изменения активности a кавитации, вызванного изменением состояния моющей жидкости. Зависимость $h(t)$, построенная согласно этому уравнению, будет нелинейной, подобно зависимости $h(t)$ в варианте 2. Однако в этом случае причины нелинейности связаны с изменением активности кавитации, а не кавитационной стойкости слоя загрязнения.

Как показали результаты экспериментов (см. рис. 4), снижение активности кавитации во время УЗ очистки, обусловленное накоплением фрагментов загрязнений в моющей жидкости, как правило, незначительно и становится довольно заметным при чрезмерно большой концентрации фрагментов. На практике, чтобы избежать такое нежелательное явление, замедляющее очистку, следует принять соответству-

Ve618.fm Page 73 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

ющие меры. Наиболее эффективно проводить очистку в проточной системе. В последнее время для очистки широко используют разные типы УЗ моечных ванн, имеющих сливное отверстие, что позволяет осуществить прокачку моющей жидкости. Если же очистка ведется в замкнутой (непроточной) системе, то для каждой очередной очистки желательно использовать свежеприготовленную моющую жидкость или проводить очистку в сравнительно большом объеме моющей жидкости, или по мере необходимости периодически менять жидкость во время очистки.

Отметим, что состояние моющей жидкости при УЗ очистке, влияющее на активность кавитации, может изменяться в результате не только накопления мелкодисперсных фрагментов загрязнений, но и ее химического состава (в случае удаления растворимых загрязнений). Кроме того, при УЗ обработке моющая жидкость может нагреваться, что также приводит к изменению активности кавитации [10].

Таким образом, экспериментально установлено, что причинами возможного нелинейного характера удаления загрязнений с поверхности во время УЗ очистки являются неоднородность структуры и, как следствие, разная кавитационная стойкость по толщине слоя загрязнения, а также изменение состояния моющей жидкости, связанное с накоплением в ней продуктов разрушения загрязнения, что приводит к изменению активности кавитации. Полученные результаты следует учитывать в практике УЗ очистки деталей машин от загрязнений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Юдаков Е. Г.** Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой очистки корпусных деталей автотракторных двигателей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 2013. 19 с.

2. **Мачалкин Ю. Н.** Исследование и обоснование технологического процесса очистки деталей дизельной топливной аппаратуры моющими растворами в ультразвуковом поле (на примере распылителей форсунок): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Всерос. научно-исслед. технол. ин-т ремонта и экспл. маш.-тракт. парка, 2003. 17 с.

3. **Сироткин И. А.** Разработка технологии высокоинтенсивной ультразвуковой очистки охлаждаемых лопаток ГТД при их изготовлении и ремонте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ, 2011. 25 с.

4. **Фатюхин Д. С.** Ультразвуковые технологии повышения эксплуатационных свойств изделий транспортного машиностроения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: МАДИ, 2014. 40 с.

5. **Приходько В. М., Меделяев И. А., Фатюхин Д. С.** Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: Монография. М.: МАДИ, 2015. 264 с.

6. **Иванов В. П.** Ремонт машин. Технология, оборудование, организация: Учебник. Новополоцк: УО "ПГУ", 2006. 468 с.

7. **Кольцова И. С., Михайлов И. Г., Сабуров Б.** Ослабление ультразвуковых волн в эмульсиях // Акустический журнал. 1973. № 5. С. 713—719.

8. **Кольцова И. С., Майсун М.** Затухание ультразвуковых волн во взвесях в широком диапазоне концентраций // Акустический журнал. 1997. Т. XIX. № 3. С. 362—366.

9. **Шутилов В. А.** Основы физики ультразвука: Учеб. пособ. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.

10. **Агранат Б. Л., Башкиров В. И., Китайгородский Ю. И.** Ультразвуковая очистка // Физические основы ультразвуковой технологии. Физика и техника мощного ультразвука. М.: Наука, 1970. Т. 3. С. 165—252.

Вниманию авторов

Не допускается предлагать к публикации уже опубликованные или намеченные к публикации в других журналах материалы.

Статьи в редакцию можно присылать на e-mail: vestmash@mashin.ru. В случае пересылки статьи почтой, кроме текста, напечатанного на белой бумаге формата А4 на одной стороне листа через 1,5—2 интервала 14-м кеглем, необходимо прикладывать электронную версию (шрифт Times New Roman в Microsoft Word, 14-й кегль, расстояние между строк 1,5).

К статье прилагаются:

1) акт экспертной комиссии, подтверждающий, что статья не содержит материалов, входящих в перечень сведений, отнесенных к государственной тайне Указом Президента РФ № 1203 от 30.11.1995, и может быть опубликована в открытой печати;

2) аннотация (1—3 предложения) и ключевые слова;

3) сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, адрес, e-mail, телефон).

Объем статьи не должен превышать 20 страниц (с рисунками и таблицами). Все страницы должны быть пронумерованы. Рисунки и таблицы давать после текста.

Представляя статью в редакцию для публикации, авторы выражают согласие с тем, что:

1) статья может быть переведена и опубликована на английском языке;

2) после публикации в журнале материал может быть размещен в Интернете;

3) авторский гонорар за публикацию статьи не выплачивается.

Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Представленные в редакцию материалы обратно не высылаются.

Минимальный срок публикации — 4 месяца со дня предоставления рукописи в редакцию при соблюдении всех изложенных выше требований (обусловлен технологическим процессом).

Ve618.fm Page 74 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.9.01

А. Н. БОЛЬШАКОВ, канд. техн. наук (Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина),
e-mail: atbasarets@mail.ru

Серия статей по теории прерывистого резания. 5. Разработка схемы резания для зоны входа режущего клина в заготовку[1]

На основании метода пластического течения А. Л. Воронцова разработана модель резания в зоне входа режущего клина инструмента в обрабатываемый материал. Определены напряженное и деформированное состояния заготовки, а также размеры очага пластической деформации. Показан переменный характер основных параметров процесса резания.

Ключевые слова: резание, зона входа инструмента, коэффициент усадки стружки, напряжение, пластическая деформация.

Based on the A. L. Vorontsov method of plastic flow, the cutting model in the input zone of the tool cutting wedge into the processed material is developed. The stressed and deformed state of the billet, as well as the dimensions of the center of plastic deformation, are determined. The variable character of the main parameters of the cutting process is shown.

Keywords: cutting, tool entry area, chip shrinkage ratio, stress, plastic deformation.

Так же, как и модель процесса резания в зоне выхода инструмента из заготовки [1], модель процесса резания для зоны входа будет основываться на схеме установившегося резания с основными допущениями, разработанная А. Л. Воронцовым с соавторами. Отличия разрабатываемой модели от других моделей и схем резания для зоны входа режущего клина в заготовку не рассматриваем, так как проведенный анализ [2] существующих публикаций показал их отсутствие. Поэтому остановимся на описании принятых условий и допущений.

Расчетная схема процесса резания (рис. 18) применима только при положительных передних углах γ. Это отличие от области примения взятой за основу схемы резания объясняется особенностью начального контакта режущего клина с заготовкой и, в частности, зарождением очага интенсивной пластической деформации в заготовке. Далее будет рассматриваться процесс резания в зоне входа инструмента при отрицательном переднем угле γ и сопоставление данных схем резания. Рассмотрим схему, представленную на рис. 18.

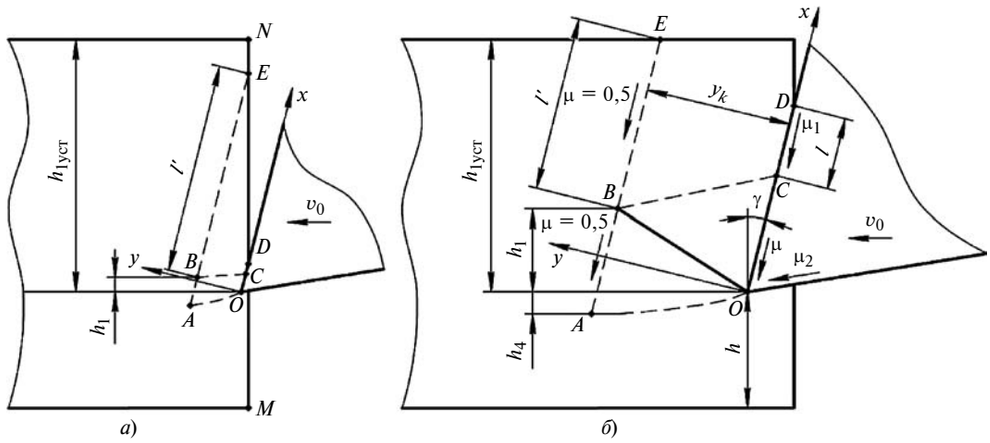
Так как принимается абсолютно острый режущий клин, то начальный контакт заготовки происходит с вершиной инструмента. При этом в течение очень короткого времени будут иметь место упругие деформации, а напряжения, действующие в зоне контакта, будут подчиняться закону Гука. При дальнейшем внедрении режущего клина в заготовку данные напряжения возрастают и при достижении определенного значения начинается пластическая деформация, формируется очаг интенсивной пластической деформации (*OABC*). Процессы зарождения и развития упругих деформаций рассматривать не будем. Но заметим, что напряжения в режущем клине возрастают постепенно относительно продолжительности входа режущего зуба в заготовку.

Для облегчения математического анализа процесса рассмотрим свободное ортогональное резание, создающее плоское деформированное состояние, т. е. деформация в перпендикулярном направлении к плоскости чертежа равна нулю. Поэтому напряженно-деформированное состояние (НДС) будем определять на единицу длины в направлении, перпендикулярном к плоскости чертежа.

Возникающий очаг *OABC* интенсивной пластической деформации ограничен передней поверхностью режущего клина (участок *OC*). Дальнейшее перемещение режущего клина будет стремиться сдвинуть зону *BEDC* вверх вдоль границы *BE* для создания пространства, которое будет заполнено режущим клином (см. рис. 18, *а*). Для первого этапа характерен выход перемычки *BE* в точке *E* на вертикальный торец *MN* заготовки, а также постоянное увеличение длины l' этой перемычки до момента, когда точка *E* выйдет на горизонтальную поверхность заготовки и совпадет с точкой *N*. Второй этап процесса входа инструмента (см. рис. 18, *б*) — уменьшение длины l' перемычки *BE* и увеличение размеров очага интенсивной пластической деформации, а также длины l контакта передней поверх-

[1] Продолжение, начало см. № 1—5 за 2018 г.

Ve618.fm Page 75 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM



а) *б*)

Рис. 18. Схемы первого (*а*) и второго (*б*) этапов резания для зоны входа при положительном переднем угле

ности со стружкой. Будем считать, что начальный контакт режущего клина с заготовкой обусловлен зарождением очага *OABC* интенсивной пластической деформации, а длина *l* контакта передней поверхности со стружкой равна нулю. При дальнейшем внедрении режущего клина в заготовку, часть материала, находящаяся за пределами очага *OABC*, будет контактировать с передней поверхностью, а длина *l* этого контакта будет пропорциональна отношению высоты h_1 очага интенсивной пластической деформации в зоне входа к высоте $h_{1\text{ус}}$ в зоне установившегося резания:

$$l = h_2(1 - \text{tg}\gamma)\frac{h_1}{h_{1\text{ус}}}.$$

При этом в момент, когда длина l' перемычки *BE* станет равна нулю, т. е. точка *B* очага *OABC* выйдет на верхнюю горизонтальную поверхность заготовки, процесс входа будет фактически закончен, начнется установившееся резание.

Граница *BE* расположена параллельно передней поверхности резца. Удаленность линии *AE* от передней поверхности режущего зуба определяется толщиной h_2 стружки, которая заранее не задается, ее находят математическим решением. Форма кривой *AO* также заранее не задана, ее находят после определения кинематики течения в очаге интенсивной пластической деформации. При этом определяют и глубину h_4 упрочненного слоя обработанной поверхности, вышедшей из-под резца.

В зоне *BCDE*, расположенной выше верхней границы очага интенсивной пластической деформации, имеют место вторичные упругопластические деформации, обусловленные выравниванием неравномерно распределенных вдоль границы *BC* скоростей пластического истечения материала заготовки в стружку. В этой зоне образующаяся стружка контактирует с передней поверхностью резца по длине *l*. Когда пластически деформированная зона высотой h_4 окажется правее острия *O* резца, начнется упругая разгрузка задней поверхности резца по длине l_3, которую определяют напряжения, действовавшие в указанной зоне в момент интенсивной пластической деформации, и угол α наклона задней поверхности резца.

Так как схема первого этапа резания не имеет принципиальных отличий от схемы второго этапа, кроме расположения перемычки *BE* и ее длины, то остальные обозначения приведены на рис. 18, *б*.

По оси *x* со стороны зоны *BCDE* на верхнюю границу *BC* очага интенсивной пластической деформации воздействует сжимающее напряжение, обусловленное направленной вдоль оси *x* силой контактного трения, действующей на длине l' вдоль границы *BE* и длине *l* вдоль границы *DC* контакта передней поверхности режущего клина с образующейся стружкой. Тогда среднее напряжение по толщине стружки по оси имеет вид:

$$\sigma_{\text{ср}} = -\beta\sigma_s\frac{0{,}5l'}{y_k} - \mu_1\beta\sigma_s\frac{l}{y_k}.$$

С учетом этого для напряжения σ_x, действующего в очаге *OABC* для точки *C*, координату которой представим как $x = uh_1$, можно записать граничное условие $\sigma_x = \sigma_{\text{ср}}$ или

$$\sigma_x = -\beta\sigma_s\frac{0{,}5l'}{y_k} - \mu_1\beta\sigma_s\frac{l}{y_k} \text{ при } x = uh_1. \qquad (40)$$

Нормальное напряжение по оси *x* имеет вид:

$$\sigma_x = \beta\sigma_s + \beta\sigma_s\left(\frac{0{,}5 + \mu}{y_k}\right)x + C_2. \qquad (41)$$

Произвольную постоянную в формуле (41) определим из граничного условия (40):

$$C_2 = -\beta\sigma_s\left[1 + \frac{0{,}5l'}{y_k} + \frac{\mu_1 l}{y_k} + (0{,}5 + \mu)\frac{uh_1}{y_k}\right]. \qquad (42)$$

Ve618.fm Page 76 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Подставив формулу (42) в выражение (41), получим нормальное напряжение по оси x:

$$\sigma_x = -\beta\sigma_s\left[\frac{0{,}5l'}{y_k} + \frac{\mu_1 l}{y_k} + (0{,}5+\mu)\left(\frac{uh_1}{y_k} - \frac{x}{y_k}\right)\right]. \quad (43)$$

Подставив в условие пластичности $\sigma_x - \sigma_y = \beta\sigma_s$ формулу (43), получим нормальное напряжение по оси y:

$$\sigma_y = -\beta\sigma_s\left[1 + \frac{0{,}5l'}{y_k} + \frac{\mu_1 l}{y_k} + (0{,}5+\mu)\left(\frac{uh_1}{y_k} - \frac{x}{y_k}\right)\right]. \quad (44)$$

Подставив в формулу (13) [1, с. 62] выражения (43) и (44), получим гидростатическое давление:

$$\sigma = -\beta\sigma_s\left[0{,}5 + \frac{0{,}5l'}{y_k} + \frac{\mu_1 l}{y_k} + (0{,}5+\mu)\left(\frac{uh_1}{y_k} - \frac{x}{y_k}\right)\right]. \quad (45)$$

Используя полученные формулы и алгоритм действий, описанный в работе [3], получим формулу силы резания:

$$P = \beta\sigma_s uh_1\left\{\left[1 + \frac{0{,}5l'}{y_k} + \frac{\mu_1 l}{y_k} + \frac{(0{,}5+\mu)uh_1}{2y_k}\right]\cos\gamma + \right.$$
$$\left. + \frac{y_k}{4uh_1\cos\gamma} + \mu\sin\gamma + \mu_2\frac{l_3}{uh_1}\right\}. \quad (46)$$

По принципу минимальной энергии деформации, определяемой в данном случае минимальной найденной силой резания (46), параметр h_2 (толщина стружки) можно найти из условия (15) [1, с. 62].

Формула (46) конкретизирует условие (15) [1]:

$$\frac{\partial}{\partial h_2} = \left\{u\sigma_s\left[\left(1 + \frac{0{,}5l'}{y_k} + \frac{\mu_1 l}{y_k} + \frac{(0{,}5+\mu)uh_1}{2y_k}\right)\cos\gamma + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \frac{y_k}{4uh_1\cos\gamma} + \mu\sin\gamma + \mu_2\frac{l_3}{uh_1}\right]\right\} = 0. \quad (47)$$

Проведем теоретическое исследование некоторых параметров процесса резания в зоне входа режущего клина в заготовку. Сначала определим коэффициент усадки стружки в этой зоне, например, при резании резцом с передним углом $\gamma = 20°$ при $\mu = 0{,}5$ и толщине срезаемого слоя $h_{1yc} = 1$ мм в зоне установившегося резания для разных материалов: малопластичного чугуна, среднепластичного алюминиевого сплава АМг5В и высокопластичной коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т.

Для учета пластичности данных материалов при определении коэффициента усадки стружки среднюю накопленную деформацию в зоне установившегося резания определяем по формуле (27) [1, с. 64].

Накопленную деформацию e_p, при которой произойдет разрушение материала, определим по диаграмме пластичности, предварительно рассчитав относительное гидростатическое давление на вершину резца ($x = 0$) по формуле

$$p = \frac{\sigma}{\sigma_s}. \quad (48)$$

С учетом формулы (44), выражение (48) примет вид:

$$p = -\beta\left[0{,}5 + \frac{0{,}5l'}{y_k} + \frac{\mu_1 l}{y_k} + (0{,}5+\mu)\left(\frac{uh_1}{y_k} - \frac{x}{y_k}\right)\right]. \quad (49)$$

Вычислим коэффициент усадки стружки для коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. Аппроксимация диаграммы пластичности имеет вид: $e_p = 1{,}84 - 0{,}75p$ [4, с. 395; рис. П4,6; кривая *2*], аппроксимация кривой упрочнения при температуре 20 °С имеет вид: $\sigma_s = 1830 - 1500e^{-e_i} - 80e^{-20e_i}$ [5, с. 93].

Длина l' в формуле (49) для первого этапа определяется выражением

$$l' = (1 - \mathrm{tg}\gamma)h_2 + 2h_2/\sin 2\gamma; \quad (50)$$

для второго этапа имеем:

$$l' = (h_{1yc} - h_1)/\cos\gamma. \quad (51)$$

Выполним вычисления для первого этапа входа режущего клина в заготовку. Как и в работе [6] для решения уравнения (46) не будем вычислять производную, а задавая непосредственно значения коэффициента K_c усадки стружки с определенным шагом, найдем такое значение K_c, при котором выражение в фигурных скобках примет минимальное значение.

Поочередно используя выражения (50), (49), (27) [1, с. 64] и (47), учитывая, что для зоны входа $y_k = h_2$ и $\mu = \mu_1 = 0{,}5$, $l_3 = 0$ (трение по задней поверхности не учитываем) и, задав первое значение $K_c = 1{,}4$, получим: $p = -3{,}62$; $e_p = 4{,}56$; $e_{icp} = 2{,}6$; $\sigma_s = 1718$ МПа; $m_1 = 6238{,}21$. При $K_c = 1{,}5$ получим: $p = -3{,}57$; $e_p = 4{,}51$; $e_{icp} = 2{,}58$; $\sigma_s = 1716$ МПа; $m_2 = 6232{,}88$, а при $K_c = 1{,}6$ имеем: $p = -3{,}52$; $e_p = 4{,}47$; $e_{icp} = 2{,}56$; $\sigma_s = 1714$ МПа; $m_3 = 6233{,}68$. Следовательно, минимальное значение по формуле (47) $m_2 = 6232{,}88$ будет при $K_c = 1{,}5$.

Приравняв выражения (50) и (51), получим формулу высоты h_1 очага интенсивной пластической деформации, при которой в зоне входа произойдет переход процесса резания из первого этапа во второй:

$$h_1 = \frac{h_{1yc}}{K_c\cos\gamma\left(1 - \mathrm{tg}\gamma + \frac{2}{\sin 2\gamma}\right) + 1}. \quad (52)$$

Ve618.fm Page 77 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

Таблица 3

Сопоставление некоторых расчетных характеристик процесса резания для зоны установившегося резания и зоны входа

Материал	$\rho_{ус}$	$\rho_{вх}$	Δ_ρ, %	$\sigma_{s\ ус}$, МПа	$\sigma_{s\ вх}$, МПа	$\Delta_{\sigma s}$, %	$\Sigma_{nус}$, МПа	$\sigma_{nвх}$, МПа	$\Delta_{\sigma n}$, %
Чугун	−1,62	−1,73	6,7	370	374	1	−815	−867	6,3
АМг5В	−1,77	−1,89	6,7	449	450	0,2	−1054	−1113	2,9
12Х18Н10Т	−1,71	−1,82	6,4	1620	1628	0,4	−3714	−3914	5,3

Подставив в выражение (51) значения $h_{1ус}$, γ и рассчитанное значение $K_с$ для первого этапа, найдем, что границе между первым и вторым этапами соответствует значение $h_1 = 0{,}15h_{1ус}$.

В реальных условиях режущий зуб имеет не идеально острую вершину, имеется скругление радиусом $r_с = 0{,}01 \div 0{,}05$ мм. При толщине срезаемого слоя $h_{1ус} = 0{,}1 \div 0{,}5$ мм и менее, как правило, величина h_1, рассчитанная по формуле (52), будет соизмерима с радиусом скругления режущей кромки, т. е. вход режущего клина начинается со второго этапа. Поэтому будем рассматривать только второй этап.

Так как исследуется резание в зоне входа в произвольный момент времени, которому соответствуют определенные длины l' и h_1, то конкретизируем этот момент времени через длину l', задав высоту h_1 очага интенсивной пластической деформации как долю от известной величины $h_{1ус}$. Например, выполним исследование при $h_1 = 0{,}15h_{1ус}$. Тогда по формуле (51) определим длину l', которая составит $l' = 6{,}03h_1$.

Как и в работе [6] для численного решения уравнения (47) не будем вычислять производную, а задавая непосредственно значения коэффициента $K_с$ усадки стружки с определенным шагом, найдем такое значение $K_с$, при котором выражение в фигурных скобках примет минимальное значение.

Поочередно используя выражения (51), (49), (27) [1, с. 64] и (47), учитывая, что для зоны входа $y_k = h_2$; $\mu = \mu_1 = 0{,}5$; $l_3 = 0$ (трение по задней поверхности не учитываем) и, задав первое значение $K_с = 3{,}7$, получим: $p = -1{,}88$; $e_р = 3{,}25$; $e_{iср} = 2{,}02$; $\sigma_s = 1632$ МПа; $m_1 = 4950{,}3$. При $K_с = 3{,}8$ получим: $p = -1{,}85$; $e_р = 3{,}23$; $e_{iср} = 2{,}01$; $\sigma_s = 1630$ МПа; $m_2 = 4948{,}65$, а при $K_с = 3{,}9$ имеем: $p = -1{,}82$; $e_р = 3{,}2$; $e_{iср} = 2{,}0$; $\sigma_s = 1628$ МПа; $m_3 = 4949{,}21$. Следовательно, минимальное значение по формуле (47) $m_2 = 4948{,}65$ будет при $K_с = 3{,}8$.

Аналогично выполним расчеты для алюминиевого сплава и чугуна, используя аппроксимации диаграмм пластичности: для алюминиевого сплава $e_р = 0{,}79 - 1{,}1p$; для чугуна $e_р = -0{,}46p$ [7]. Аппроксимация кривой упрочнения при температуре 20 °С для алюминиевого сплава имеет вид: $\sigma_s = 466 - 100e^{-e_i} - 130e^{-20e_i}$ [8, с. 81, рис. 162], для чугуна: $\sigma_s = 488 - 221e^{-e_i} - 12e^{-3e_i}$ [9, с. 107; рис. 5,25 *е*].

Также сравним нормальное напряжение, действующее на острие режущего клина ($x = 0$) при тех же исходных параметрах резания в зоне входа ($y_k = h_2$) и в зоне установившегося резания. Необходимые данные для сравнения, соответствующие зоне установившегося резания, были получены ранее [1, табл. 2]. Подставив выражение (51) и $\mu = \mu_1 = 0{,}5$; $\beta = 1{,}155$ в формулу (44), рассчитали данные показатели в зоне входа инструмента для рассматриваемых материалов (табл. 3).

Результаты исследований показали, что в зоне входа инструмента возрастают напряжение текучести обрабатываемого материала и нормальное напряжение, действующее на резец.

(*Продолжение следует*)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Большаков А. Н.** Теория прерывистого резания. 3. Разработка схемы резания для зоны выхода режущего клина из заготовки // Вестник машиностроения. 2018. № 4. С. 60—65.

2. **Большаков А. Н.** Теория прерывистого резания. 2. Состояние вопроса // Вестник машиностроения. 2018. № 3. С. 70—76.

3. **Воронцов А. Л., Султан-заде Н. М., Албагачиев А. Ю.** Разработка новой теории резания. 5. Определение кинематического, напряженного и деформированного состояний обрабатываемой заготовки // Вестник машиностроения. 2008. № 5. С. 61—69.

4. **Расчет** и проектирование процессов объемной штамповки: учебное пособие / Субич В. Н., Шестаков Н. А., Демин В. А. и др. М.: МГИУ, 2007. 414 с.

5. **Воронцов А. Л.** Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Т. 1. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 396 с.

6. **Воронцов А. Л., Султан-заде Н. М., Албагачиев А. Ю.** Разработка новой теории резания. 6. Определение основных параметров процесса резания // Вестник машиностроения. 2008. № 6. С. 64—70.

7. **Воронцов А. Л., Султан-заде Н. М., Албагачиев А. Ю.** Разработка новой теории резания. 7. Математическое описание образования различных видов стружки, пульсации силы резания, а также параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56—61.

8. **Кроха В. А.** Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. М.: Машиностроение, 1968. 131 с.

9. **Кроха В. А.** Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник. М.: Машиностроение, 1980. 157 с.

Ve618.fm Page 78 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

УДК 621.774

С. Н. ПОЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук (Компания "Инновационные технологии", г. Екатеринбург), С. В. БУТАКОВ, Л. В. МАЛЬЦЕВ, кандидаты технических наук, И. С. ОЛЬКОВ (УРФУ им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург), М. А. ПОПОВ (Корпорация "ВСМПО-АВИСМА", г. Верхняя Салда), В. А. АЛЕКСАНДРОВ, канд. техн. наук (Уральский ГАУ, г. Екатеринбург), e-mail: psn50@mail.ru

Резка и раскрой слябов и толстых плит из сплавов титана

Рассмотрены способы резки толстых плит и слябов из сплавов титана и оценка показателей качества поверхности реза и производительности. Установлено, что водоабразивная резка наиболее универсальна и обеспечивает хорошие показатели качества поверхности при умеренной стоимости.

Ключевые слова: резка, сплав титана, толстая плита, сляб, разрезаемость, показатель качества поверхности.

The methods of cutting of thick plates and slabs from titanium alloys and evaluation of the quality of the cutting surface and productivity are considered. It is determined, that water-abrasive cutting is the most universal and provides good surface quality parameters at moderate cost.

Keywords: cutting, titanium alloy, thick plate, slab, cutability, surface quality index.

Оценка разрезаемости меняется с развитием техники, совершенствованием технологии и разработки новых способов резки. Технологически понятие "разрезаемость" — получение сквозного разреза по толщине металла с заданным качеством поверхности реза и обеспечением требований термического или механического влияния в приповерхностной зоне.

Для материалов толщиной до 900 мм нет альтернативы газовой резке [1] — традиционной технологии обработки металлов, которая широко используется в разных отраслях промышленности. Процесс осуществляется путем химического и теплового воздействия. Металл по линии разреза нагревается до температуры воспламенения и сжижается в струе чистого кислорода, при этом струей удаляются продукты сгорания. Основной диапазон разрезаемых толщин 10÷300 мм. При этом получают ровную вертикальную поверхность с хорошим качеством реза (металлургическая однородность, оксидирование). Традиционно на машинах термической резки используют немецкие резаки фирмы Messer — старейшего лидера в области газокислородной резки металлов [1].

Газовая резка — простая и относительно недорогая, так как капитальные затраты минимальны и используются тривиальные дешевые газы [2]. При правильном регулировании параметров процесса газовая резка обеспечивает гладкую и плоскую поверхность реза с минимальным количеством шлака на нижней кромке реза и незначительное закругление верхней кромки от действия пламени. Получаемое качество кромок позволяет исключить их дополнительную отделку при дальнейшей обработке. Отметим, что скорость резки на современных установках плазменной резки при толщине металла менее 75 мм выше скорости газовой резки.

Сочетание современных газовых горелок с новейшей многоступенчатой системой подачи режущего газа обеспечивает наилучшее качество реза, а также позволяет пробивать отверстия диаметром, меньше толщины металла, что невозможно при традиционной газокислородной резке. Современные газорезательные машины типа OMNIMAT фирмы MesserGriesheim хорошо работают, позволяют практически исключить операции засверловки и строжки, а также изготовление копиров и нанесение разметки. Машина кислородной резки разрезает заготовки толщиной до 300 мм. Операцию резки и раскроя плит и слябов из сплавов титана успешно реализуют с высокой производительностью при удовлетворительном качестве на установке EASYTHERM 3100 фирмы Messer (Германия) (рис. 1).

Протяженность зоны термического влияния зависит от режимов резки, физических свойств и толщины разрезаемого материала. Проведенные за последние годы исследования показали, что для образцов из стали толщиной 20÷1000 мм общая протяженность этой зоны составила от 2 до 55 мм. В зоне термического влияния твердость поверхности реза составила 400 HV_{50} с постепенным повышением до 630 HV_{50} на глубине 1,5 мм. Затем твердость уменьшалась до 320 HV_{50} на глубине 5,5 мм [3].

При раскрое титановых плит толщиной 150÷300 мм ширина пропила составила 10÷15 мм, а зона термического влияния — 10÷40 мм. Скорость резки плит из сплавов титана толщиной

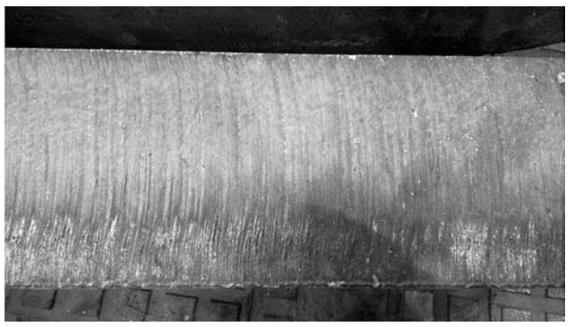


Рис. 1. Поверхность реза сляба толщиной 200 мм из сплава титана Ti6Al4V на установке EASYTHERM 3100

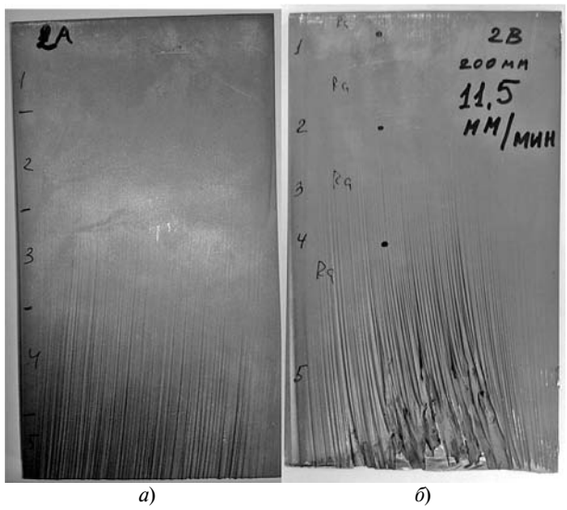
Ve618.fm Page 79 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

20÷250 мм изменялась в пределах 485÷130 мм/мин. При работе использовали резак Messer с соплом PL-RC. Например, минимальная скорость резки плиты толщиной 200 мм из сплава Ti6Al4V составила 198 мм/мин; расход режущего газа (кислород) — 2,305 м^3 на 1 м длины реза при давлении 7,5 МПа.

Технология водоабразивной резки является наиболее универсальной опцией механической обработки титана разных толщин [4, 5]. На основании многочисленных исследований разработаны методы оценки "разрезаемости" материалов в широком диапазоне толщин. Для испытаний использовали натурные образцы клиновидной формы. Оборудование и параметры операции гидроабразивной резки выбирали по рекомендациям работы [6]. Эффективность воздействия способа резки на качество разрезаемых титановых плит рассматривается в работе [7]: исследованы показатели качества поверхности (ПКП), полученные при гидроабразивной, плазменной и лазерной резке. Установлено, что оптимальные ПКП реза достигаются при гидроабразивной резке, плазменная резка дает минимальные дефекты. В работе [8] выполнены металлографические и рентгеноструктурные исследования поверхности и приповерхностных слоев плит из сплавов титана, алюминия, высоколегированных сталей и др. Установлено отсутствие загрязненности поверхности реза, определены геометрические параметры плоскости реза, показано, что структура металла поверхности при гидроабразивной резке полностью соответствует основному металлу, степень и глубина наклепа минимальны.

При освоении обработки новых материалов для предварительной оценки предлагается использовать индекс обрабатываемости и индекс абразива [9]. В работе [10] сделаны попытки установить зависимость индекса обрабатываемости ("разрезаемость") от твердости обрабатываемого материала. Однако для цветных металлов (титан, алюминий, медь) этот индекс не коррелирует с твердостью (табл. 1). Известны индексы обрабатываемости более 40 марок материалов — от карбидов (0,1) до известняка (6156,4).

Раскрой плит и слябов толщиной 200÷350 мм из сплава Ti6Al4V исследовали на установке гидроабразивной (водоабразивной) резки фирмы PTV (Чехия): рабочее давление — 413 МПа; мощность — 75 кВт; насос — H2OJET; режущая головка — MixingChamberPaser 4; смесительная трубка — Roctec 100 длиной 76 мм с внутренним диаметром 1,02 и 1,27 мм; водяное сопло с внутренним диаметром 0,36 и 0,48 мм; подача абразива — 700÷1000 г/мин. В качестве абразива использовали гранат GMA фракции 0,18 мм.



а) *б*)

Рис. 2. Поверхность реза сляба из сплава Ti6Al4V толщиной 200 мм на установке PTV:

а — хорошее качество реза, скорость 5,5÷9,1 мм/мин; *б* — удовлетворительное качество реза (разделительный рез), скорость 11,5 мм/мин

Измерения ПКП реза выполняли с применением мобильного профилографа-профилометра Sartronic 10 (диапазон Ra = 0,1÷10 мкм, погрешность ±5 %), щупа и угольника. Параметр шероховатости исследуемой поверхности составил Ra = 1,9÷4,5 мкм, глубина дефектов — 0,15÷6,84 мм, отклонение плоскости реза от перпендикулярности — 0÷6°.

Хорошие ПКП реза для плит толщиной 200 мм из сплава Ti6Al4V получены при скорости резки 9 мм/мин и указанных в табл. 2 расходах воды и абразива. Для плит толщиной 350 мм хорошие ПКП реза обеспечиваются при максимальной скорости 4,7 мм/мин. Натурные образцы разрезанных сечений представлены на рис. 2.

Таблица 1

Характеристики обрабатываемости металлов

№ п/п	Материал	Индекс обрабатываемости	Твердость, Rockwell B	Абразив, индекс		
				Garnet Barton HPX	Blastite BT (Al_2O_3)	VitroGrit Grushed Glass
1	Углеродистая сталь	81,3	69,5	1,00	1,11	0,46
2	Коррозионно-стойкая сталь 316	83,1	77,5	—	—	—
3	Алюминий 2024	215,3	68,0	1,00	1,21	0,83
4	Медь *C*110	102,8	35,0	—	—	—
5	Титан 64	108,3	109,0	—	—	—

Ve618.fm Page 80 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

После водоабразивной резки образцов толщиной 200, 250 и 300 мм качество поверхности соответствует нормам, принятым на ВСМПО, а поверхность реза образцов толщиной 350 мм требует дополнительной механической обработки.

Осваивается внедрение метода раскроя плит и слябов на ленточноотрезных станках. Известен положительный опыт раскроя слябов из сплавов алюминия. Компания Bonetti (Италия) [11] выпускает высокопроизводительное оборудование для раскроя плит и слябов. Известные марки станков 800NCH и 2000NF предназначены для обработки слябов из алюминиевых сплавов. В 2015 г. фирма Bonetti создала в России совместное предприятие по производству крупногабаритных ленточнопильных станков [11].

Для авиакосмических деталей из сплавов титана, имеющих высокие стоимость и уровень качества, требуются машины с жесткой статической и динамической структурой. Низкая жесткость приводит к вибрациям режущего инструмента, что ухудшает ПКП обрабатываемого изделия, вследствие нарушения интегрируемости "станок — изделие". Крупногабаритные заготовки с большой площадью обрабатываемой поверхности требуют применения специальных ленточнопильных станков с высокими инвестиционными затратами (большой срок окупаемости, низкая прибыль), занимающих большие производственные площади.

Система охлаждения ленточнопильного станка имеет большой объем и работает при высоком давлении СОЖ, которая уменьшает трение и износ, охлаждает зубья пилы, отводит теплоту, предотвращает молекулярное сцепление стружки с зубьями инструмента, а также смазывает стружку, что облегчает ее движение через зону резания. С повышением скорости резания отвод теплоты уменьшается, а шероховатость обрабатываемой поверхности увеличивается. При низких скоростях резания шероховатость уменьшается. Концентрация СОЖ должна соответствовать рекомендуемой для обрабатываемого материала. Используют качественную синтетическую или полусинтетическую водорастворимую эмульсию на масляной основе, которую рекомендуется менять 1—2 раза в год, а также промывать всю систему подачи. Необходима обильная подача СОЖ в зону резания (как минимум по трем каналам). Применение некачественной СОЖ снижает стойкость полотна пилы на 10÷20 % [13].

Инструмент — одно из основных слагаемых успеха технологии резки пилами. Наибольшее распространение получили биметаллические пилы М42. В 2009 г. компания Wikus (Германия) сняла с производства пилы с режущими кромками из материала М51 и представила новое поколение высокотехнологичного материала Х3000, полученного из высококачественной быстрорежущей стали методом порошковой металлургии. В отличие от традиционных быстрорежущих сталей М42 и М51 применение материала Х3000 обеспечило ряд преимуществ, в том числе повышение на 25÷50 % стойкости инструмента.

Твердосплавные ленточные пилы экономически оправдано применять на станках с максимально плавной и равномерной подачей пильной рамы и необходимой мощностью пиления [13]: 2,5 кВт мощности для каждых 100 мм распила. Данные пилы рекомендуются для высокопроизводительной

Таблица 2

Характеристики водоабразивной резки плит из сплава Ti6Al4V

№ п/п	Толщина, мм	Инструмент		Расход		Скорость резки, мм/мин	Качество поверхности реза
		Сопло, вода	Трубка смесительная	воды, л/мин	абразива, г/мин		
1	200	0,013	0,040	3,25	700	5,69	Хорошее
2		0,014	0,040	3,77	1000	7,40	То же
3		0,014	0,040	3,77	700	11,5	Удовлетворительное
4		0,019	0,050	6,95	1000	9,08	Хорошее
5	250	0,014	0,040	3,77	700	4,95	То же
6		0,019	0,050	6,95	1000	7,03	—"—
7		0,014	0,040	3,77	700	8,90	Удовлетворительное
8		0,019	0,050	6,95	1000	7,03	Хорошее
9	300	0,014	0,040	3,77	700	4,01	То же
10		0,014	0,040	3,77	1000	4,60	—"—
11		0,019	0,050	6,95	1000	5,70	—"—
12	350	0,014	0,040	3,77	700	3,36	Удовлетворительное
13					1000	3,90	Хорошее
14					700	6,50	Удовлетворительное
15					1000	4,72	Хорошее

Ve618.fm Page 81 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

резки труднообрабатываемых сплавов твердостью до 62 *HRC*. Инструмент фирмы Wikus (Германия) отличает геометрия зубьев, имеющих режущие кромки твердостью до 1600÷3800 *HV*. Пилы марки WikusFutura имеют патентованную заточку кромок зубьев для специального шлифования плоскости реза. Для резки труднообрабатываемых материалов фирмой BAHCO (Швеция, www.banco.com) разработана уникальная форма зубьев с тройной разводкой с передним углом 10°.

Необходим правильный баланс между продолжительностью обработки и стойкостью режущего инструмента, которая равна его непрерывной работе от переточки до переточки или до выхода из строя и составляет минуты при обработке титана и часы при обработке алюминия. Для резки титана наиболее эффективны высококачественные биметаллические или твердосплавные пилы и станки ведущих фирм Kasto (Германия), Danobat (Испания) и др. В качестве поставщика СОЖ рекомендуется немецкая фирма ZET-Chemie: при резке титана максимальную мощность и долговечность пил обеспечивают СОЖ ZET-viscowas 30 или ZET-cut 678.

Титановые сплавы не склонны к наростообразованию, что в сочетании с небольшим коэффициентом трения способствует уменьшению шероховатости обработанной поверхности. Проведены многочисленные тестирования влияния разных типов смазки на шероховатость поверхности [14].

Обрабатываемость ("разрезаемость") материала оценивают по стойкости инструмента, усилию резки и качеству обработанной поверхности. Основное влияние на обрабатываемость оказывает правильный выбор инструмента и СОЖ. Меньшую обрабатываемость резанием сплавов титана объясняют низкой теплопроводностью и жесткостью обрабатываемых деталей. Так, коэффициент обрабатываемости сплава ВТ6 составляет 0,22÷0,26 [15] по сравнению с принятой за эталон сталью 45, коэффициент обрабатываемости которой равен 1,0.

Таблица 3

Характеристики резки сляба Ti6Al4V толщиной 200 мм

№ п/п	Параметр	Способ резки		
		газом	водой	лентой
1	Скорость резки, мм/мин	198	9	7÷10
2	Зона термического влияния, мм	До 30	0	0
3	Ширина пропила, мм	10÷15	2,5	2,5
4	Шероховатость *Ra*, мкм	Нет данных	1,9÷4,5	0,85÷2,3
5	Не перпендикулярность реза, град.	7÷12	2÷4	0
6	Мощность, кВт	7,5	75	28 (7,5)

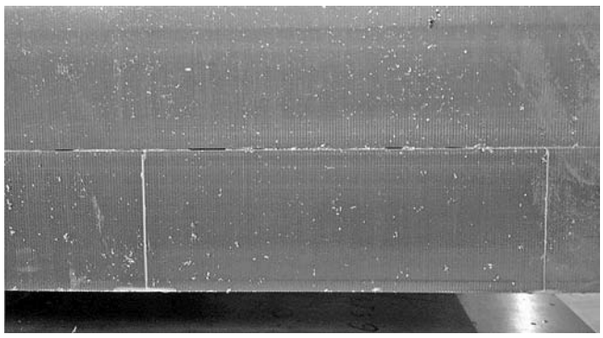


Рис. 3. Поверхности реза сляба толщиной 200 мм из сплава Ti6Al4V на ленточнопильных станках Kasto (Германия)

На заводе TimetUK (Швеция) для раскроя титановых плит используют станки Kasto (Германия) и твердосплавные (карбид вольфрама) пилы. Скорость резки плит толщиной 100 мм составляла 6÷8 мм/мин, толщиной 40 мм — 20 мм/мин; точность реза — 0÷1,5 мм [16].

Исследовали резку титана марки Gr.5 на станках фирмы Danobat [12] биметаллическими пилами со стойкостью 6,5 м^2 (площадь разрезаемой поверхности металла до переточки) при скорости реза 45 мм/мин. Число резов плит размером 102 × 3000 мм составило 42.

Корпорация "ВСМПО-АВИСМА" для резки титановых плит использует станки Kasto и пилы WikusFutura 545 и BAHCO 3868 TSX со стойкостью 4÷12 м^2. Титановые сплавы по степени обрабатываемости ленточными пилами разбили на пять групп. Скорость резки убывает с повышением твердости разрезаемого металла. Для резки плит толщиной 150÷300 мм выбрали скорость 27÷22 мм/мин для сплавов первой группы и 11÷9 мм/мин — для сплавов пятой группы (рис. 3).

Результаты исследований резки сляба из сплава Ti6Al4V разными способами приведены в табл. 3. Максимальную производительность при минимальной стоимости обеспечивает газовая резка. Раскрой сляба ленточными пилами обеспечивает получение ПКП на прямых участках, близких к оптимальным ПКП. Водоабразивная резка более универсальна и позволяет решать широкий круг задач с получением хороших ПКП при умеренной стоимости.

Проведенный анализ показал, что российские предприятия для резки и раскроя слябов и толстых плит используют современное оборудование ведущих мировых фирм. В последние годы в России начато производство ленточнопильных станков, установок термической и водоабразивной резки, как правило, на основе импортных комплектующих. Следует отметить, что пользователи оборудования полностью зависят от поставок расходных материалов и запасных частей из США, Европы и Азии.

Ve618.fm Page 82 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.438:339.562.001.73

В. М. КРАЕВ, д-р техн. наук, А. И. ТИХОНОВ, канд. техн. наук, С. В. НОВИКОВ, канд. экон. наук (МАИ), e-mail: kxaevvm@mail.ru

Импортозамещающие производства авиационных двигателей в России

Проанализированы направления развития и ключевые задачи современного авиационного двигателестроения. Рассмотрены достижения российских производителей и перспективы по импортозамещению в данной отрасли.

Ключевые слова: авиационный двигатель, газотурбинный двигатель, когенерационные установки, импортозамещение, конкуренция.

The directions of development and the key problems of modern aircraft engine building are analyzed. The achievements of Russian manufacturers and the prospects for import substitution in this field are considered.

Keywords: aircraft engine, gas turbine engine, cogeneration units, import substitution, competition.

Стратегия развития экономики России, направленная на импортозамещение, была принята в 2009 г., так как кризис 2008 г. показал уязвимость отечественной экономики ввиду высокой доли в экспорте сырья и зависимости от мировых цен на нефть и газ. В конце 2013 г. было принято Постановление Правительства РФ № 1224 [1], направленное на защиту оборонно-промышленного комплекса.

В 2014 г. [2] усиление курса на импортозамещение было обусловлено введением ряда стран в отношении России торгово-экономических санкций и ответных санкций со стороны России. Таким образом, перспективные цели по импортозамещению стали требованиями сегодняшнего дня. Были созданы правительственные комиссии по импортозамещению, начались работы по созданию пакета нормативных актов по государственной поддержке отечественных производителей [3—5].

Сегодня самый быстрый отклик на сложившиеся условия наблюдается в сельском хозяйстве. В машиностроении же импортозамещение требует и бóльших средств, и бóльшего времени ввиду высокой сложности продукций и технологий, кроме то-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 78)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Original** messer oxyfuel technology. [Электронный ресурс]. URL: http://www.messer-cs.com/en/eu/products/oxyfuel-equi pment/ (Usage date: 06.07.2017).
2. **Shuda D.** Plasma and oxyfuel: A productive combination. How one plate cutting workhorse complements the other // The Fabricator. October 2014.
3. **Центральный** металлический портал РФ. [Электронный ресурс]. URL: http: // www.metallicheckiy-portal.ru (дата обращения: 06.07.2017).
4. **Titanium** processing center. [Электронный ресурс]. URL: http: // www.titaniumprocessingcenter.com (Usage date: 06.07.2017).
5. **Полянский С. Н., Бутаков С. В.** Интенсификация использования технологической среды // Вестник машиностроения. 2013. № 4. С. 59—61.
6. **Burnham C.** 6 ways to optimize a waterjet for your shop // The Fabricator. February 2017.
7. **Eslampanah A. H.** Effect of cutting methods on property of pure titanium // Columban J. Life Sci. 2015. V. 17. N. 1. P. 136—139.
8. **Полянский С. Н., Нестеров А. С.** Промышленное оборудование для гидроабразивной резки // Вестник машиностроения. 2004. № 5. С. 43—46.
9. **American** WJTA Conference and Expo August 19—21. 2007. Houston, Texas DETERMINATION OF MACHINABILITY AND ABRASIVE CUTTING PROPERTIES IN AWJ CUTTING Jay Zeng OMAX Corporation Kent. Washington. USA.
10. **Bonetti** OPUS Cutting Solutions. [Электронный ресурс]. URL: http: // www.segatrici.it (Usage date: 06.07.2017).
11. **Ленточнопильные** станки для передовых решений и инновационных идей. [Электронный ресурс]. URL: http: //www.bonettigroup.ru (дата обращения: 06.07.2017).
12. **ВИ-МЕНС** Современные технологии. [Электронный ресурс]. URL: http: // www.vimens.ru (дата обращения: 06.07.2017).
13. **DANOBAT.** Band saw Machines. [Электронный ресурс]. URL: http: // www.danobatbandsaws.com/en (Usage date: 06.07.2017).
14. **Nabeel Gharaibeh.** Vegetable and Mineral Used Oils as Cutting Fluids: Effect on Surface Roughness of Aluminum Alloy // Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. 2016. 6. P. 176—182.
15. **ВНИИАЛМАЗ.** [Электронный ресурс]. URL: http:// www.vniialmaz.ru (дата обращения: 06.07.2017).
16. **Machinery.** [Электронный ресурс]. URL: http: // www.machinery.co.uk (Usage date: 06.07.2017).

Ve618.fm Page 83 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

го, необходима кооперация многих отраслей промышленности, требуются высококвалифицированные инженерно-технические кадры, причем не предпенсионного возраста, а с долгосрочной перспективой работы в этой области [6—7].

Наиболее важными направлениями в импортозамещении являются: станкостроение (доля импорта на 2014 г. ≈90 %), тяжелое машиностроение (доля импорта ≈70 %), радиоэлектроника (80÷90 %), фармацевтическая и медицинская промышленности (70÷80 %), авиационная промышленность (≈80 %).

Проведенные в 2014 г. исследования Министерством промышленности и торговли РФ выявили ключевые перспективные тенденции и потребности в развитии промышленности и, в частности, значительный дефицит инженерного персонала.

Особое место в машиностроении занимает авиастроение ввиду высокого научного потенциала, наличия высококвалифицированных кадров и значительной доли военной авиатехники в экспорте.

Еще в 2014 г. был подготовлен план полного замещения военной продукции, поставляемой Украиной. До 2015 г. Россия ежегодно получала от Украины более 3000 наименований комплектующих на 100 млн долл. США. Так, в 2014 г. авиапром России использовал для военных кораблей 60 % редукторов украинского производства. Только на Украине производились тормозные парашюты и узлы гидросистем для Су-27, Су-30 и Су-35. Авиадвигатели для российских самолетов и вертолетов изготовлял Запорожский завод "Мотор Сич", что создало для российской промышленности существенные трудности по поставкам газотурбинных двигателей [8]. Данная ситуация сложилась и из-за неправильного подхода — сначала разрабатывать проект самолета, а потом создавать двигатель. При этом известно, что на разработку двигателя требуется значительно больше времени. Поэтому первый турбореактивный авиадвигатель ПД-14 (двигатель пятого поколения), созданный в России после распада СССР, следует использовать не только на самолете МС-21, его необходимо адаптировать и для других летательных аппаратов. С учетом этого пассажирский самолет МС-21 к началу серийного производства будет на 60 % состоять из комплектующих отечественного производства [9].

Примером успешного импортозамещения можно считать и создание в 2016 г. компанией "Ротек" полного технологического цикла восстановления деталей горячего тракта двигателя. При этом финансирование проекта осуществлялось собственными средствами.

Сегодня рынок газотурбинных двигателей занят такими производителями, как General Electric, Rolls-Royce, Safran и Pratt & Whithney, которые проводят политику консолидации активов поглощением более мелких компаний смежных сегментов рынка. Например, покупка концерном General Electric в 2015 г. компании Alstom [10], а в 2016 г. компаний Arcam и SLM Solutions Group AG, сфера деятельности которых — плавления и обработки металла при производстве компонентов аэрокосмической, энергетической, медицинской и автомобильной отраслей [11]. Кроме того, приобретение 75 % акций Concept Laser GmbH позволило General Electric контролировать разработку и производство лазерных компонентов для авиационной отрасли [12].

General Electric за последнее десятилетие инвестировал более 1,5 млрд долл. США в разработку и производство различных компонентов на базе керамики [11], что позволило на 30 % снизить массу изделий и повысить рабочие температуры [12, 13]. Кроме того, General Electric внедряет авиационные технологии в производство газотурбинных двигателей других назначений. Например, использование системы электрического старта в судовых газовых турбинах, что повышает надежность и снижает эксплуатационные расходы по сравнению с применением гидравлической системой пуска [14].

Предприятия концерна Safran, занимающиеся двигателестроением, еще в 80-х годах прошлого века взяли курс на использование композитных материалов. В 2014 г. был открыт научно-исследовательский центр по разработке трехмерных композиционных материалов [15], использование которых обеспечивает выпуск более прочных и легких деталей двигателя и на 15 % снижает потребление топлива [16]. В 2016 г. концерн Safran потратил на НИОКР около 1,7 млрд евро [11].

В концерне Safran разработанные для военных двигателей технологии применяются и для гражданской авиации. Так, изготовление лопаток из новых материалов позволило на 500 °С повысить температуру турбины высокого давления [15].

Объединение усилий фирм Safran и General Electric позволило заменить двигатели SFM-56 на более экономичные и эффективные двигатели LEAD. Их преимущества: снижение расхода топлива на 15 %, значительно меньше CO_2 в отработавших газах, а NO_x на 50 %, соответствие требованиям ICAO по уровню шума [17]. Все это позволило ему успешно конкурировать с двигателем PW1000G [18].

Компания Rolls-Royce решает задачи по улучшению эксплуатационных показателей своей продукции, направленные на защиту окружающей среды: до 2050 г. по сравнению с показателями 2000 г. снизить эмиссию CO_2 на 75 % и эмиссию NO_x на 90 %, уровень шума при работе двигателя — на 65 % [19, 20]. Расходы на научные исследования компании Rolls-Royce составляют более 6 % от годового дохода [21].

Ve618.fm Page 84 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

В США в 2016 г. выделено 30 млн долл. на создание центра научных исследований и разработки керамических композиционных материалов, предназначенных для следующих поколений авиационных двигателей [22]. Сегодня на Rolls-Royce разрабатывается концепция гибридных электрических двигателей не только малой тяги, но и для самолетов регионального назначения [23].

Отметим, что все инвестиции в этой области, а они значительные, в итоге окупаются многократно. На первых этапах создаются инновационные двигатели для военной и гражданской авиации. После освоения и отладки серийного производства авиационных двигателей, инновационные решения внедряются в производство морских газотурбинных двигателей, а затем и для наземных генераторных установок [24].

В компании Pratt & Whitney ведутся работы по созданию адаптивного двигателя [25], особенностью которого является использование в дополнении к традиционному низкому (второму) контура высокого (третьего) воздушного контура. При взлете и полете на максимальной скорости третий контур закрывается для обеспечения максимальной тяги. При полете на крейсерской дозвуковой скорости третий воздушный контур открывается для увеличения тяги двигателя и снижения потребления топлива. Новая технология позволит снизить расход топлива на 20÷30 %.

Без постоянного совершенствования выпускаемой продукции любое машиностроительное предприятие ждет отставание от конкурентов, а следовательно, потеря рынка. Поэтому необходимы инвестиции в научные разработки с учетом мировых тенденций в двигателестроении [26, 27].

Основными направлениями в совершенствовании данной продукции являются:

экономия топлива, так как затраты на топливо могут составлять до половины эксплуатационных расходов;

снижение веса изделия, что обусловливает использование новых более легких и прочных материалов;

повышение рабочих температур, что достигается применением интерметаллических соединений со свойствами керамики;

высокая ремонтопригодность составляющих и их простота;

применение аддитивного производства (3D-печать).

Последнее позволяет уменьшить число деталей, что снижает вес конструкции ввиду сокращения сборок, экономит топливо и снижает себестоимость деталей.

Данный подход получил поддержку Правительства в стратегии развития авиационной промышленности России на период до 2030 г. [28] и в государственной программе поддержки авиапрома на 2013—2025 гг. [29].

Подъем научно-исследовательских работ в авиационном двигателестроении в России подтверждает годовой финансовый документ Объединенной двигателестроительной корпорации [9]. В 2015 г. затраты на научные разработки составили более 6 млрд руб., при этом они превысили на 25 % годовую выручку корпорации. Однако нельзя забывать, что проектирование современных газотурбинных двигателей это только первый шаг к решению проблемы, не менее важно доведение их серийного производства и обеспечение послепродажного обслуживания. В дальнейшем на базе отработанных технологий необходимо развивать смежные рынки газотурбинных двигателей — морские и наземные установки.

С учетом выгодного для российской экономики изменения за последние годы курса национальной валюты газотурбинные установки отечественного производства стали доступнее для российских потребителей. В результате санкционных мероприятий и реализации валютных рисков в 2016 г. существенно снизилась доля импорта ГТД [4], а потребность в них ежегодно увеличивается на 10 %. При этом отечественная продукция может с успехом заменить изделия зарубежных компаниям, ежегодные поставки которых оцениваются в 150÷200 млн долл. США, а включая услуги по послепродажному обслуживанию, эта сумма будет в 1,5 раза выше.

Открываются перспективы по применению новейших технологий авиационного двигателестроения и в других отраслях. Например, создание современных наземных газотурбинных установок для генерации энергии для компрессорных станций и жилищно-коммунальных хозяйств (ЖКХ). Учитывая изношенность котельного оборудования в России, потребность ЖКХ в эффективном оборудовании средней (до 25 МВт) и малой мощности чрезвычайно высокая, следовательно, когенерационные газотурбинные установки будут иметь большой спрос.

Концепция импортозамещения должна основываться на национальной модели и поддерживаться системой стимулов с перспективой выхода на мировой рынок, что позволит отечественным производителям выйти на новый уровень.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Постановление** Правительства РФ от 24.12.2013. № 1224 "Об установлении запрета и ограничений на допуск товаров, происходящих из иностранных государств, работ, выполняемых иностранными лицами, для целей осуществления закупок товаров, работ для нужд обороны страны и безопасности государства".

2. **Артющик В. Д., Гусаков А. Г., Тихонов А. И.** Развитие авиационной промышленности РФ в условиях

Ve618.fm Page 85 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

импортозамещения // Московский экономический журнал. 2016. № 3. С. 46.

3. **Постановление** Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 328 "Об утверждении государственной программы по развитию промышленности и повышения ее конкурентоспособности".

4. **Постановление** Правительства РФ от 04.08.2015 г. № 785 "О создании Правительственной комиссии по импортозамещению".

5. **Постановление** Правительства РФ от 31.07.2015 г. № 779 "О промышленных кластерах и специализированных организациях промышленных кластеров".

6. **Тихонов А. И., Новиков С. В.** Совершенствование конкурсных процедур отбора высокотехнологичных проектов в условиях импортозамещения // Высшая школа. 2016. Т. 2. № 12. С. 22—25.

7. **Тихонов А. И.** Модель комплексной реализации концепции импортозамещения в инновационной среде (на примере авиационного двигателестроения) // Вестник МАИ. 2015. Т. 22. № 3. С. 146—153.

8. **Зеленцова Л. С., Тихонов А. И., Шестакова Е. В.** Организационно-экономические инструменты обеспечения конкурентоустойчивости предприятия авиационного двигателестроения. М.: МАИ, 2015. 160 с.

9. **АО "Объединенная** двигателестроительная корпорация": Финансовый отчет за 2015 г.: http://www.uecrus.eom/rus/documents/5/

10. **Alstom's** Shareholders Meeting authorises the sale of the Energy businesses to General Electric: http://www.alstom.com/energy-businesses-to-general-electric

11. **General** Electric Plans to Invest $1.4B to Acquire Additive Manufacturing Companies Arcam and SLM: http://www.geaviation.com/ge-plans-invest-14b-acquire-additive-manufacturing-companies

12. **General** Electric to Acquire a 75 % stake in Concept Laser: http://www.industrial-lasers.com/ge-to-acquire-a-75-stake-in-concept-laser.html

13. **General** Electric Aviation Moving To Apply Ceramic Matrix Composites to the Heart of Future Engines: http://www.geaviation.com/ ge-aviation-moving-apply-ceramic-matrix-composites-heart-future

14. **General** Electric Offers Electric Start Systems For Marine Gas Turbines: http://www.marineinsight.com/shi pping-news/ge-offers-electric-start-systems-marine-gas-turbines

15. **General** Electric Aviation to Build Unique Materials Factories: http://www.forecastinternational.com/news/index.cfmrecno

16. **A320neo** with CFM LEAP-1A engines receives joint EASA / FAA certification: https://www.safran-group.com/media_a320neo-cfm-leap-la-engines-receives-joint-easa/faa-certification

17. **New material** for General Electric Aviation a play for the future. Bowdeya Tweh:http://www.cincinnati.com/story/money/ge-aviation-cmc-future/82649420

18. **Jimmy Kenyon.** Discusses 'What's Next' for Propulsion Orlando, FLA: http://www.pw.utc.com/Speeches/Story/201703 08-1200/30/Categories

19. **Rolls-Royce** Holdings 2016 Full Year Results Tuesday: https://www.rolls-royce.com/media/holdings-plc-2016-full-year-results.aspx

20. **FUTURE** OF FLIGHT: https://www.rolls-royce.com/innovation/advance-and-ultrafan.aspx-overview

21. **Rolls-Royce** expands Aerospace research center in Southern California: https://www.rolls-royce.com/media/press-releases.aspx

22. **3D-woven** composite materials: the Jacquard loom 2.0: https://www.safran-group.com/media/3d-woven-composite-materials-jacquard-loom

23. **Rolls-Royce:** the future of flight is electric: http://www.telegraph.co.uk/business/rolls-royce-future-flight-electric

24. **Safran:** 2016 annual results: https://www.safran-group.com/media/safran-2016-annual-results

25. **2016** Annual Report Financial and Corporate Responsibility Performance: http: // 2016ar.utc.com / assets / pdfs / UTCAR2016 _ Financials.pdf

26. **5 Trends** in Jet engine Manufacturing. Howard Weaver, Kevin Meyer: http://edgeupdate.com/5-trends-in-jet-engine-manufacturing

27. **Pratt & Whitney** Canada to Invest Over $ 1 Billion in R & D: http://www.investquebec.com/international/news/Pratt-and-Whitney-Canada-to-Invest-Over-1-Billion-dollars-in-R-D.html

28. **Стратегия** развития авиационной промышленности РФ до 2030 г. http://minpromtorg.gov.ru/docs/#!strategiya_razvitiya_aviacionnoy_promyshlen nosti_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2030_goda

29. **Государственная** программа поддержки авиапрома на 2013—2025 гг.: http://government.ru/programs/220/events

30. **Федеральная** таможенная служба: http://stat.customs.ru

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ ЖУРНАЛА
"ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ"

Подписка на журнал принимается по каталогу:

"Пресса России" — индекс **27841**

Ve618.fm Page 86 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

УДК 621.757:621.7.08

С. Г. КОМАИШКО, Г. Н. КУЛИК, канд. техн. наук, К. В. СУЗДАЛЬ, А. В. ТИМОФЕЕВ (ООО "Дефорт", г. Санкт-Петербург), e-mail: kulik.georgnik@rambler.ru

Технологическая наследственность в машиностроении. Часть 2

Рассматриваются некоторые пути устранения технологической наследственности в деталях и, в частности, в непрецизионных трубных заготовках с использованием универсальных токарных станков и специально разработанной оснастки.

Ключевые слова: растачивание, шлифование, местная зачистка, двойная опорная база, скрытая база.

The some ways of technological heredity eliminating in parts and, in particular, in non-precision pipe billets using universal lathes and specially designed tooling are considered.

Keywords: boring, grinding, local cleaning, double support base, hidden base.

При изготовлении любого изделия (детали) и даже еще при его проектировании необходимо учитывать множество факторов, которые будут влиять на изделие при эксплуатации. К таким факторам можно отнести нормы изготовления, условия эксплуатации и др. Это так называемая технологическая наследственность, которая чаще всего бывает негативной и влияние которой стремятся уменьшить или совсем устранить.

Цель данной работы — устранение негативной наследственности при эксплуатации, но с учетом того, что требования к заготовке (повышенная точность, уменьшенные овальность, разностенность и кривизна) выше требований, предусмотренных в нормативной документации при ее производстве.

Рассмотрим устранение негативной наследственности автоклавного реактора для получения полиэтилена высокого давления при ремонте. Реакция полимеризации этилена в автоклаве идет с выделением тепла ≈1000 ккал/кг. Чтобы избежать чрезмерной активности процесса, приводящей к взрывному разложению этилена, необходимо обеспечить непрерывное охлаждение стенок реактора. При разложении этилена, которое сопровождается быстрым повышением давления и температуры, образуются метан (80 %), водород (17 %) и углерод, оседающий на внутренней поверхности в виде мелкодисперсной сажи. Выделяющийся водород приводит к наводораживанию металла внутренней поверхности стенок и, как следствие, образованию сетки мелких трещин, трудно выявляемых при неразрушающем контроле. Повышение температуры при разложении также приводит к изменению прочностных характеристик металла аппарата.

Реактор автоклава располагается вертикально и представляет собой толстостенный цилиндрический аппарат с внутренним диаметром 305 мм, толщиной стенки 101,6 мм и высотой реакционной части 3505 мм. Высота аппарата с асинхронным электродвигателем и крышками — 5310 мм, мощность электродвигателя 30 кВт, частота вращения 1000 мин$^{-1}$. Желобчатая мешалка с валом диаметром 152,5 мм обеспечивает местное горизонтальное и общее вертикальное перемешивания среды. От превышения давления реактор защищен двумя предохранительными мембранами, так называемыми взрывными клапанами. Корпуса реактора и двигателя, а также крышки изготовлены цельнокованными из стали 30CrNiMo8 и термообработаны по режиму: закалка при 850 °С с охлаждением в масле и отпуск при 640 °С с охлаждением на воздухе.

Порядок проведения ремонта реактора [1]: визуальный и измерительный контроль; ультразвуковая, а также цветная или магнитная дефектоскопия; измерение твердости; термообработка (отпуск для снятия напряжений); визуальный и измерительный контроль; ультразвуковая, а также цветная или магнитная дефектоскопия; измерение твердости; растачивание; шлифование (для получения поверхности, соответствующей требованиям к поверхностям деталей, работающих при сверхвысоком давлении); визуальный и измерительный контроль; ультразвуковая, а также цветная или магнитная дефектоскопия; сборка; нагружение гидравлическим давлением; разборка; визуальный и измерительный контроль; расчеты на прочность для получения разрешения на дальнейшую эксплуатацию; консервация; упаковка (демонтаж, упаковка, транспортировка и т. д.).

Ve618.fm Page 87 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

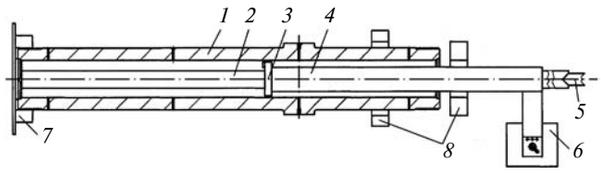


Рис. 1. Устройство для растачивания глубоких отверстий:
1 — корпус реактора; *2* — скалка; *3* — фланец крепления резца; *4* — оправка; *5* — задняя бабка; *6* — резцедержатель; *7* — патрон; *8* — люнеты

В данном случае интерес представляет процесс растачивания, который выполняют с помощью специального устройства [2], устанавливаемом на станке.

Устройство (рис. 1) предназначено для растачивания глубокого отверстия в детали, обрабатываемой на станке, который имеет задний центр и шпиндельную бабку со шпинделем. Устройство содержит закрепляемую в резцедержателе станка оправку для установки резца, которая выполняется полой и размещается соосно на штоке с помощью направляющих, обеспечивающих ее перемещение по штоку в продольном направлении. Длина штока больше длины оправки. Кроме того, один конец штока поджат задним центром станка, а другой конец с вращающимся центром упирается в деталь, установленную в шпинделе. Иногда между обрабатываемой деталью и задним центром станка устанавливают люнет для дополнительной опоры оправки. При растачивании корпусов реактора и электродвигателя один конец закрепляется в патроне шпинделя, а второй на люнете.

Кроме автоклавных реакторов для получения полиэтилена высокого давления используют трубчатые реакторы, состоящие из отдельных секций, соединенных между собой коленами. Секция имеет длину до 12 м, внешний диаметр 146 мм, внутренний — 60 мм, на концах труб выполнена резьба М140×3.

Порядок проведения ремонта секций трубчатого реактора: визуальный контроль; снятие фланцев и рубашки; измерение твердости по длине корпуса; подготовка корпуса к термообработке; термообработка (отпуск для снятия напряжений); очистка от окалины; измерение твердости; визуальный и измерительный контроль; ультразвуковой контроль; проверка резьбы с использованием цветной или магнитной дефектоскопии; внутреннее шлифование; визуальный и измерительный контроль; ультразвуковая толщинометрия; гидравлические испытания корпуса (трубы высокого давления); визуальный и измерительный контроль; установка запорных втулок и рубашки с компенсатором; визуальный и измерительный контроль сварочных швов; ультразвуковая и цветная дефектоскопия сварочных швов; гидравлические испытания корпуса и рубашки; визуальный и измерительный контроль; цветная дефектоскопия сварочных швов; навинчивание фланцев. В данном случае интерес представляет внутреннее шлифование, особенно местное.

Для общего шлифования внутренней поверхности использовали устройство для финишной обработки внутренних цилиндрических поверхностей [3]. Корпус устройства закрепляют на оправке, передающей ему вращательное движение. Корпус выполнен в виде цилиндра, на противоположных сторонах которого расположены по две идентичные щеки с наружным диаметром, меньшим диаметра обрабатываемой внутренней цилиндрической поверхности. Между щеками установлено по одному кулачку, который закрепляется на щеках и может двигаться относительно оси крепления. Наружный диаметр каждого кулачка меньше диаметра обрабатываемой внутренней цилиндрической поверхности. К корпусу с двух сторон, противоположных расположению щек, прикреплены вдоль наружных сторон кулачков отрезки шлифовальной шкурки рабочей поверхностью наружу.

Внутреннюю поверхность шлифуют до получения параметра шероховатости $Ra = 0{,}2 \div 0{,}4$ мкм. При наличии дефектов, не удаленных при общем шлифовании, их устраняют местным шлифованием до сглаживания края дефекта. Для этого используют приспособление (рис. 2) [4], которое содержит подвижную в продольном направлении от внешнего привода державку, вводимую в длинномерную трубу. На вводимом конце державки установлены два соединенных стяжкой диска, диаметр которых соизмерим с диаметром обрабатываемой внутренней поверхности. Во время работы диски перемещаются в трубе. На диске со стороны державки через упругий элемент установлен шлифовальный

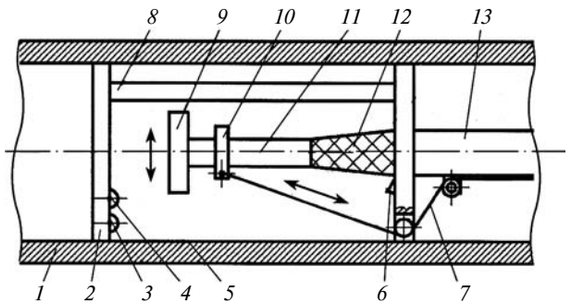


Рис. 2. Приспособление для удаления дефектов на внутренней поверхности длинномерной трубы или глубокого отверстия:
1 — шлифуемое изделие; *2* — диски; *3* — подсветка; *4* — видеокамера; *5* — дефект; *6* — приемник пылесоса; *7* — тросик управления перемещением шлифовального инструмента; *8* — стяжка между дисками; *9* — абразивный инструмент; *10* — хомут; *11* — шлифовальная машинка; *12* — упругий элемент; *13* — удерживающая штанга

Ve618.fm Page 88 Wednesday, May 16, 2018 10:45 AM

инструмент — шлифовальная машинка. Она снабжена закрепляемым с помощью хомута тросиком, связанным через ролики, размещенные на диске и державке, с механизмом движения (находящимся вне трубы) шлифовальной машины в длинномерной трубе в радиальном направлении. После шлифования замеряют глубину выборки в месте дефекта и измеряют общую толщину. По результатам измерений проводят прочностной расчет.

Устранение негативной наследственности при получении прямолинейного канала в трубе большого диаметра рассмотрим на примере использования непрецизионных труб или заготовок, как в работе [5]. Однако для описанного способа характерна конструктивно сложная оснастка, которую можно изготовить только в условиях крупносерийного производства. Кроме того, способ отличается высокими требованиями к заготовкам, которые называются непрецизионными, а требования к ним гораздо жестче требований, указанных в ГОСТ 9940—81 "Трубы бесшовные" или в Американских национальных стандартах "Стандартные технические условия на бесшовные и сварные трубы из аустенитных нержавеющих марок стали" (см. Ежегодный сборник стандартов ASTM, A3/2A 312 M-01a, таблица 3). Указанная оснастка практически опробована только для мелкоразмерных труб. При этом размеры оснастки для труб большого диаметра многократно увеличиваются, а возможности подготовки геометрии таких труб резко уменьшаются, так как необходимы соответствующие оснастка, станки и др.

Задачей способа [5] является изготовление в длинномерной трубе внутреннего прямолинейного с определенными допусками канала, независимо от возможной при этом разностенности. Для изготовления канала с соотношением длины к внутреннему диаметру $l/d_0 > 100$ использовали несколько модернизированный универсальный токарный станок и известные приспособления [2, 6].

В качестве примера можно привести растачивание одинаковых прямолинейных отверстий в 16 трубах из стали AISI 321 длиной 5500 мм с внутренним диаметром 470 мм и толщиной стенки 30 мм. После их обмера установлено максимальное биение 7 мм посередине длины труб. Приняли величину расточки 16 мм на диаметр, а толщину одной из прокладок под кулачок трехкулачкового самоустанавливающегося патрона, равной 10,58 мм. Под два другие кулачка прокладки не требуются.

Заключение

Разработанная оснастка позволяет устранить технологическую наследственность без применения специализированного оборудования, используя универсальный токарный станок.

Использование приспособления для местной зачистки в ограниченных условиях позволяет снизить трудоемкость ремонта или сделать его более реальным. Ремонт реакторов для производства полиэтилена высокого давления позволил эксплуатирующим предприятиям решить проблему импортозамещения, так как ранее такой ремонт выполнялся только за рубежом.

Установка дополнительной опоры посередине трубы позволила реализовать двойную опорную базу и преобразовать скрытую базу трубы в реальную, что упростило токарную обработку внутренней поверхности трубы с необходимой точностью.

С помощью приспособления [2, 6] можно устранить технологическую наследственность в виде кривизны заготовки или при использовании непрецизионной трубной заготовки для получения прецизионной детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Капитальный** ремонт автоклавного реактора для изготовления полиэтилена высокого давления / В. Я. Дмитриев, С. Г. Комаишко, Г. Н. Кулик и др. // Вестник машиностроения. 2011. № 1. С. 81—83.

2. **Пат. 69434 на полезную модель**. Устройство для расточки глубоких отверстий.

3. **Пат. 68948 на полезную модель.** Устройство для финишной обработки внутренних цилиндрических поверхностей.

4. **Пат. 90004 на полезную модель.** Приспособление для удаления дефектов на внутренней поверхности длинномерной трубы или глубокого отверстия.

5. **Прогрессивная** технология растачивания отверстий в трубах из непрецизионных заготовок / И. Ф. Звонцов, А. С. Рассказов, П. П. Серебреницкий П. П. и др. // Металлообработка. 2012. № 1 (67). С. 15—23.

6. **Пат. 97663 на полезную модель.** Приспособление для управления инструментом при обработке днища глубокого глухого отверстия.