

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 13
2017
№ 8 (152)
август

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д.т.н., проф.
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета

д.т.н., проф., заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

Редационный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.
В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:
И.Н. МЫМИРИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.
Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Михрютина А.В., Кожина Т.Д. Концептуальная модель физико-химической основы метода разработки оптимальной структуры и химического состава демпфирующих покрытий лопаток ГТД 339

Безъязычный В.Ф., Морскова С.В. Определение расчетного натяга при сборке неподвижных неразъемных соединений с учетом параметров качества поверхностного слоя соединяемых деталей и особенностей процесса обработки резанием 344

Безъязычный В.Ф., Басков М.В. Влияние покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей 348

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Безъязычный В.Ф., Прокофьев М.А., Бардинова С.Н. Расчетное определение параметров упрочнения материала поверхностного слоя деталей при механической обработке 353

Безъязычный В.Ф., Голованов Д.С. Методика определения остаточных напряжений в поверхностном слое детали при дорновании 360

Волков Д.И., Гуцин А.Ю., Рыкунов А.Н. Технологические возможности обработки металлическими и стеклянными микрошариками материалов ВТ9 и ЭИ787ВД 365

Болотеин А.Н., Сутягин А.Н. Моделирование трибоконтакта сопрягаемых деталей машин с учетом упрочнения поверхностного слоя 369

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Упрочнение поверхностного слоя рабочих поверхностей зубчатых колес с помощью химико-термической обработки 374

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Безъязычный В.Ф., Румянцева Н.В., Бардинова С.Н., Смирнов А.В. Использование упрочняющих методов обработки при ремонте лопаток компрессора газотурбинных двигателей 379

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 13
2017
№ 8 (152)
August

Since 2005, January

Editor-in-Chief

Dr. of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council

Dr. of Eng. Sci., The honoured
worker of a science and
technics of the RF
V.F. BEZYAZICHNYI

Editorial Assistant

Dr. of Phys.-Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:

Dr. of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr. of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr. of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA

Editorial council:

Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
N.K. KRIONI
V.P. KUZNETSOV
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

Edition:

I.N. MYMRINA
T.V. PARAYSKAYA

CONTENTS



GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Mikhryutina A.V., Kozhina T.D. Conceptual model of physical and chemical basis of method of development of optimal GTE blade damping coating structure and chemical composition 339

Bezyazichnyi V.F., Morskova S.V. Definition of the design preload when assembling fixed permanent connections based on the parameters of surface layer quality of the parts and features of process of machining 344

Bezyazichnyi V.F., Baskov M.V. Influence of coatings of the cutting tool on the quality parameters of the surface layer of the machined parts 348



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Bezyazichnyi V.F., Prokofiev M.A., Bardinova S.N. Calculation of hardening parameters of the material of the surface layer during machining 353

Bezyazichnyi V.F., Golovanov D.S. Technique of determination of surface layer residual stresses during burnishing 360

Volkov D.I., Gushchin A.Yu., Rykunov A.N. Technological possibilities of processing by metal and glass microspheres of materials VT9 and EI787VD 365

Bolotein A.N., Sutyagin A.N. Modeling of tribocontact of mating machine parts taking into account hardening of the surface layer 369



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Shehovtseva E.V., Shehovtseva T.V. Strengthening of surface layer of gears working surfaces with use of thermochemical processing 374



INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Bezyazichnyi V.F., Rumyantseva N.V., Bardinova S.N., Smirnov A.V. Using the strengthening processing methods for repair of the compressor blades of gas turbine engine 379

Journal is spreaded on a subscription,
which can be issued in any post office
(index on the catalogue "Pressa Rossii"
39269) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by
Roskomnadzor. The certificate
of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015

Reprint is possible only with the reference to the journal
"Strengthening technologies and coatings"

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian
Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses,
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform



УДК 621.452.3

А.В. Михрютина, Т.Д. Кожина

(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)

E-mail: mikhryutina.a@yandex.ru

Концептуальная модель физико-химической основы метода разработки оптимальной структуры и химического состава демпфирующих покрытий лопаток ГТД

На основе анализа современных научных данных разработана концептуальная модель физико-химической основы метода разработки оптимальной структуры и химического состава демпфирующих покрытий лопаток газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: лопатки ГТД, эрозионный износ, свойства материалов и покрытий.

This paper presents a conceptual model of physical and chemical basis of the method of development of optimal structure and chemical composition of damping coatings for GTE blades, developed based on the analysis of modern scientific knowledge.

Keywords: GTE blades, erosive wear, properties of materials and coatings.

Введение

В процессе эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) в условиях запыленной атмосферы возникает эрозионный износ их деталей, прежде всего лопаток первой ступени компрессора низкого давления (рис. 1). Эрозионный износ лопаток компрессора приводит к снижению эксплуатационных характеристик как самого компрессора, так и двигателя в целом. Проведено множество экспериментальных исследований, раскрывающих

природу эрозионного износа, а для защиты поверхностей лопаток ГТД разработаны и продолжают разрабатываться различные варианты защитных покрытий. Очень важной характеристикой защитного покрытия является его демпфирующая способность, т. е. способность поглощать энергию частиц для снижения их воздействия при вторичных соударениях. Для обеспечения требуемого уровня эрозионной стойкости и демпфирования авторами предлагается разработать расчетный метод, включающий в себя физико-химические модели для оценки свойств поверхности.

Разработка концептуальной модели на основе современных знаний

Необходимость защиты поверхностей лопаток от разрушительных последствий эрозии предопределила проведение многочисленных исследований физической природы этого процесса в целях создания способов модификации поверхности, которые обеспечат требуемую эрозионную стойкость. Установлено, что при эрозионном износе твердыми частицами имеют место следующие физические явления: упругая деформация, пластиче-

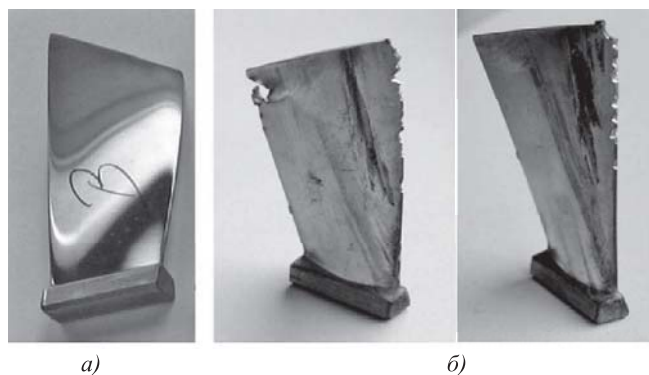


Рис. 1. Новая (а) и изношенные (б) лопатки [1]

ская деформация, локальное плавление, трещинообразование по хрупкому механизму, а также окислительные и коррозионные процессы. Эти явления лежат в основе различных механизмов эрозионного износа. В работе [2] F.G. Schmitt обобщил имеющиеся сведения, полученные различными учеными.

Упругая деформация возникает при соударении твердой частицы с поверхностью детали, если при этом не превышен предел текучести материала детали. В этом случае частицы отталкиваются под углом, приблизительно равным углу падения. Далее частица либо увлекается потоком, либо сталкивается с другой поверхностью. Упругая деформация не вызывает стойких изменений в структуре материала и не приводит к деградации поверхности.

Пластическая/упругопластическая деформация характерна прежде всего для деталей из пластичных материалов. При углах атаки частиц 20...30° поверхность "пропахивается" с образованием валика материала, который может быть отделен от поверхности как сразу, так и в результате последующих воздействий. При углах атаки 80...90° воздействие частицы на материал детали аналогично процессу индентирования. Значительная часть кинетической энергии твердой частицы затрачивается на пластическую деформацию материала, благодаря чему снижается ее скорость и уменьшается угол отскока по сравнению с углом падения. Немаловажно, что в результате пластической деформации происходит упрочнение поверхности, благодаря чему ее износостойкость в начальный период может увеличиться, и далее износ будет происходить по усталостному механизму.

Наличие *локального плавления* было идентифицировано по возникновению искр и наличию застывших микрокапель металла округлой формы. Локальное плавление не было признано учеными как существенный фактор эрозионного износа.

Образование трещин по хрупкому механизму характерно для материалов с высокой твердостью и низкой пластичностью. В этом случае максимум интенсивности эрозионного износа приходится на углы атаки частиц около 90°.

Процесс деградации поверхностей усиливается окислительными и коррозионными явлениями.

Анализ физических явлений, возникающих при эрозионном износе, позволяет сделать вывод, что повышение эрозионной стойкости лопаток ГТД возможно при обеспечении таких качеств поверхности, как высокая твердость — для защиты от износа при малых углах атаки частиц, высокая пластичность — для защиты от износа при углах атаки около 90° и демпфирующая способность, т. е.

способность поглощать энергию частиц при соударениях с поверхностью — в целях снижения скорости и угла направления движения частицы после соударения для предотвращения ее соударения с другими поверхностями. Противоречивость таких требований, необходимость поиска компромисса — главная проблема при создании защитных покрытий для лопаток ГТД.

К настоящему времени получено достаточно большое число разнообразных эрозионно стойких покрытий для лопаток ГТД. Простейшими являются однослойные покрытия, такие как TiN, ZrN, VN, CrN. Такие покрытия показали свою эффективность, но их недостатком является то, что образовавшаяся на поверхности трещина развивается и беспрепятственно проникает в материал лопатки. В 80-х гг. прошлого века советскими учеными были предложены многослойные покрытия, состоящие из чередующихся слоев титана и нитрида титана. Преимуществом таких покрытий является то, что они менее склонны к распространению трещин, чем однослойные, за счет наличия поверхностей раздела фаз. На основе этой идеи были разработаны покрытия с металлическими и керамическими слоями, состоящими из других материалов [3] (металлическая фаза — Co, Ni, Cr, Nb, Zr; керамическая фаза — TiZrN, TiCrN, TiAlN, TiNbN ...). Такие покрытия обладают демпфирующей способностью за счет наличия пластичного металлического слоя. Институтом электросварки им. Е.О. Патона (Украина) разработаны градиентные покрытия Sn—Cr—MgO, обладающие высокой твердостью, трещиностойкостью и высокой адгезионной способностью [4]. Учеными Sam Zhang, Hui Li Wang и др. (Республика Сингапур) [5] были разработаны нанокompозитные покрытия nc-TiC/a-C(Al) и nc-TiN/a-Si₃N₄, обладающие очень высокой твердостью и при этом значительной вязкостью и трещиностойкостью. Существуют и другие виды покрытий, которые существенно отличаются от описанных как по структуре, так и по химическому составу.

Анализ текущего состояния науки в области эрозионного износа и эрозионно стойких покрытий показывает, что современные теоретические представления о физической природе эрозионного износа дают достаточно ясную картину механизмов износа, а практическая реализация имеющихся знаний в виде защитных покрытий для лопаток ГТД и других деталей, подверженных эрозии, отличается большим разнообразием структур и химических составов защитных покрытий. Особенностью развития науки об эрозионном износе на современном этапе является отсутствие общего метода, охватывающего сово-

купность соответствующих физических моделей и позволяющего расчетным путем достигать требуемых свойств покрытий, включая высокую износостойкость и способность к демпфированию, за счет изменения химического состава и структуры покрытия. Задача создания такого метода является актуальной и своевременной.

В работе [6] предложена общая концепция расчетного метода определения оптимальной структуры и химического состава защитных демпфирующих покрытий для лопаток компрессоров ГТД

(рис. 2). Укрупненно концепция включает в себя следующие этапы:

- I. Формирование комплекса исходных данных.
- II. Газодинамический расчет компрессора с определением температур и напряжений в конструкции и прогнозной интенсивности эрозионного износа.
- III. Моделирование структуры и химического состава защитного покрытия в целях обеспечения оптимальной износостойкости, демпфирующих и адгезионных свойств.

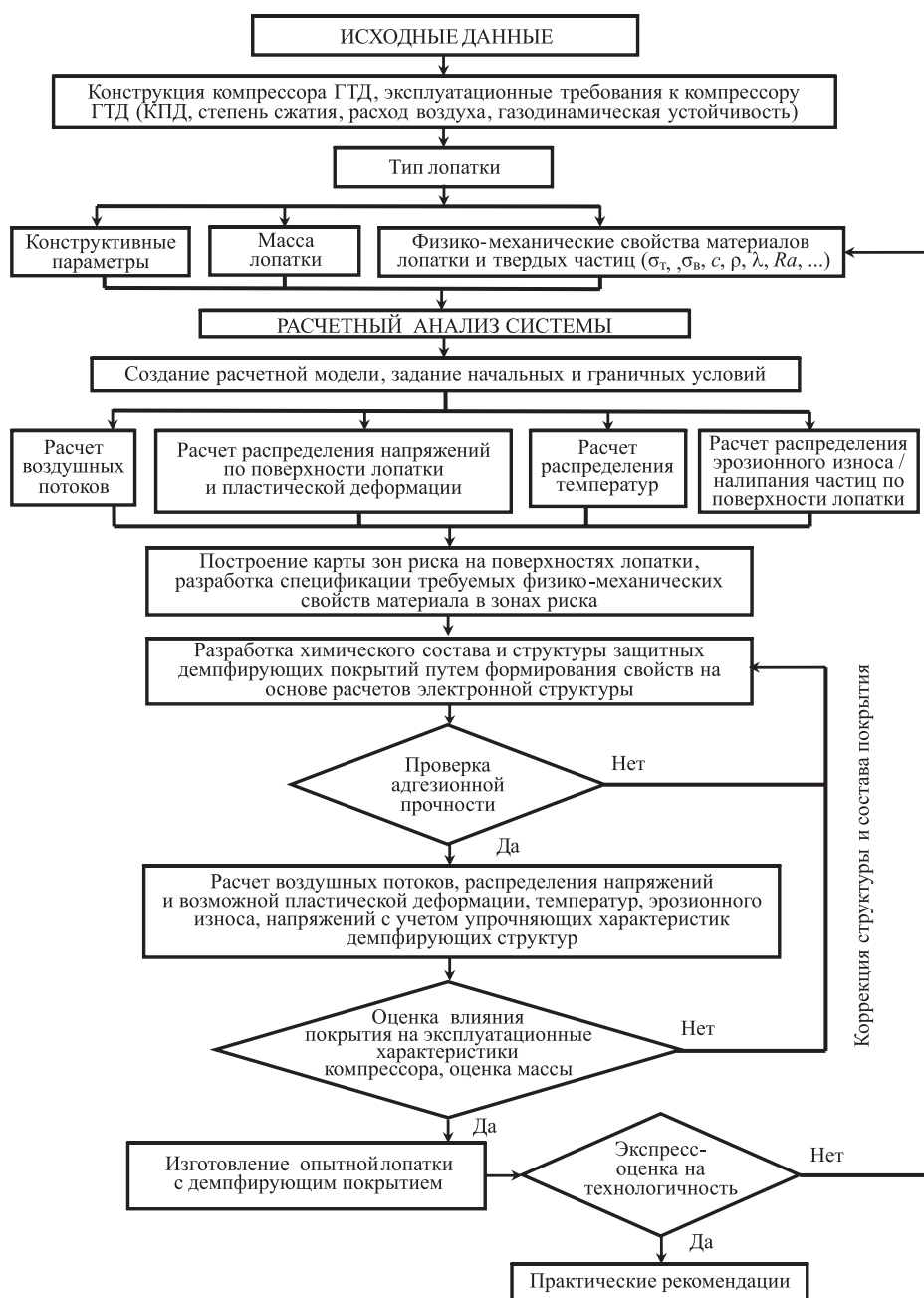


Рис. 2. Концепция расчетного метода выбора оптимальной структуры и химического состава защитных демпфирующих покрытий для лопаток компрессоров ГТД

IV. Оценка эксплуатационных свойств компрессора при наличии выбранного защитного слоя на лопатках.

V. Изготовление опытной лопатки и выдача практических рекомендаций.

Рассмотрим этап III, являющийся физико-химической основой предложенного расчетного метода, позволяющего сформировать оптимальную структуру и химический состав защитного

покрытия. На этом этапе должно происходить формирование структуры и химического состава покрытия, которые обеспечат наилучшую защиту лопатки при заданных условиях эксплуатации. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: выбрать подход для расчетной оценки свойств покрытий и разработать модели для оценки свойств, обеспечивающих защиту от эрозионного износа.

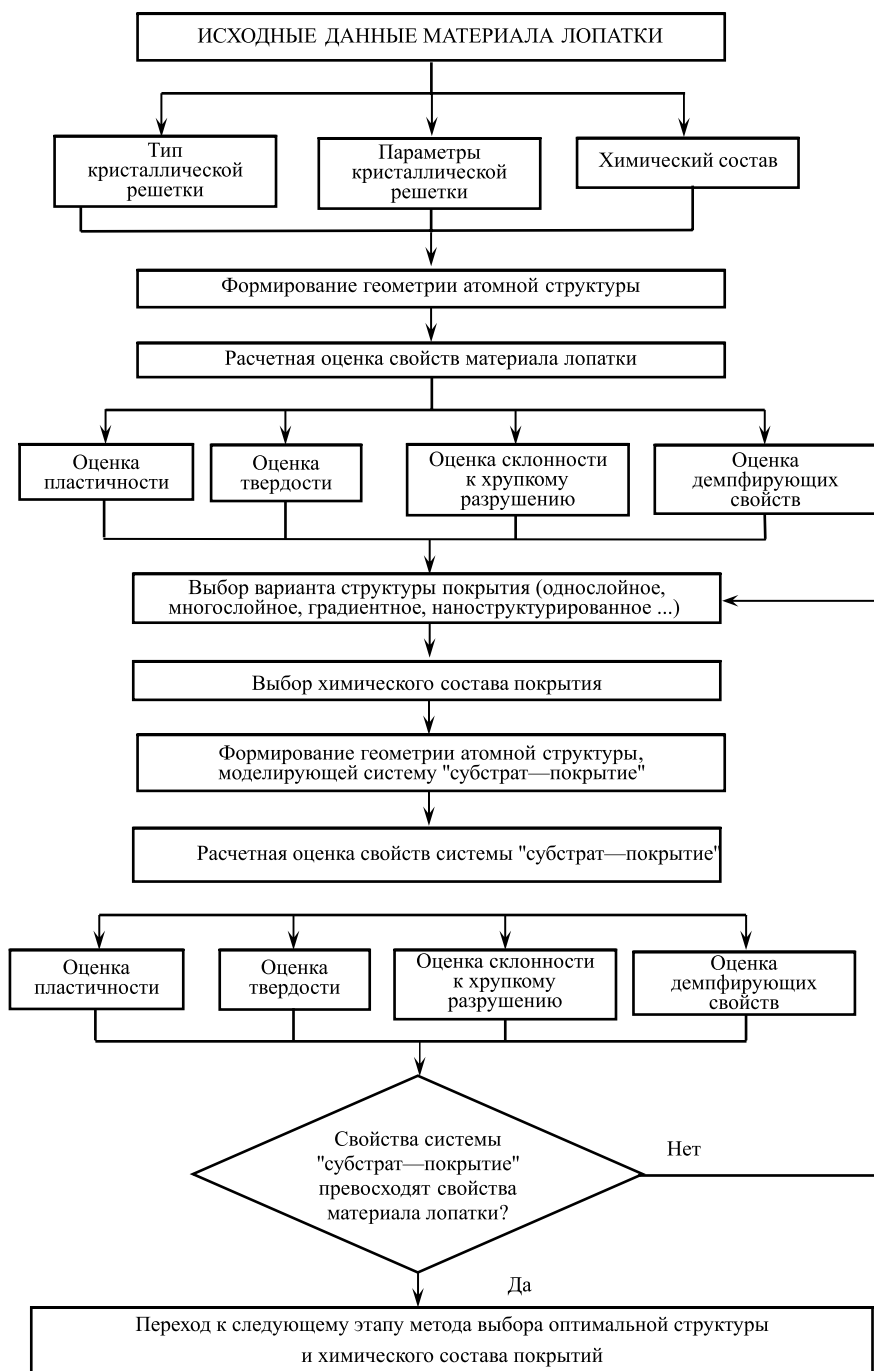


Рис. 3. Концептуальная модель физико-химической основы метода разработки оптимальной структуры и химического состава демпфирующих покрытий лопаток ГТД

В качестве расчетного подхода авторами предлагается применить современные разработки в области квантовой теории вещества. В настоящее время для оценки свойств материалов с успехом применяется решение уравнения Шредингера для многоэлектронной системы методом функционала электронной плотности. Суть данного метода заключается в том, что все свойства электронной структуры системы в невырожденном основном состоянии полностью определяются ее электронной плотностью. Метод позволяет осуществлять расчеты для широкого класса систем: от малых молекул до аморфных тел без использования эмпирических данных. Производительность метода значительно превышает производительность решения методом Хартри—Фока.

Предлагаемую концептуальную модель физико-химической основы метода разработки оптимальной структуры и химического состава демпфирующих покрытий лопаток ГТД (рис. 3) условно можно разделить на две последовательные стадии: оценка свойств материала лопатки без покрытия и оценка свойств материала с покрытием с последующим их сравнением. Расчет может проводиться многократно до достижения наилучшего результата. Для оценки свойств материала должен быть разработан базовый набор физических моделей, включая модели для оценки пластических свойств покрытия, твердости, склонности к хрупкому разрушению, демпфирующей способности с учетом специфики условий эксплуатации лопаток. Расчеты методом функционала электронной плотности позволят определить энергетическое состояние атомных структур, разработанных в рамках таких моделей, на основании которого можно будет сделать вывод о соответствующих свойствах материала.

Например, для характеристики пластичности необходимо оценить энергию образования и движения дислокаций и т. д. Для оценки адгезионных свойств может использоваться модель, предложенная в [7].

Кроме того, проведение расчетных экспериментов с данной моделью поможет выявить закономерности влияния интересующих факторов на свойства покрытий без проведения дорогостоящих экспериментов. Для этого может потребоваться разработка дополнительных моделей физических процессов.

Выводы

Анализ современного уровня знаний и технологий в области защитных демпфирующих покрытий для лопаток компрессоров ГТД показывает необходимость создания расчетного метода

разработки оптимальной структуры и свойств покрытий. Физико-химическую основу метода составляет оценка эффективности применения защитных покрытий. Оценку свойств системы "материал лопатки — покрытие" предлагается проводить "из первых принципов" с использованием метода функционала электронной плотности для расчетов энергетического состояния атомных структур. Приведенная концептуальная модель включает расчетные модели для оценки физических свойств, непосредственно влияющих на интенсивность эрозионного износа. Результаты расчета являются исходными данными для следующего этапа расчетов по методу разработки оптимальной структуры и химического состава демпфирующих покрытий лопаток ГТД, имеющего целью расчет воздушных потоков, распределения напряжений и возможной пластической деформации, температур, эрозионного износа и напряжений на поверхности лопаток.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **О проблеме** попадания посторонних предметов в двигатель летательного аппарата [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://avia-simply.ru/popadanie-postoronnih-predmetov-v-dvigatel/> (дата обращения 27.04.2017).
2. **Schmitt F. G.** Liquid and solid particle impact erosion, Air Force Materials Laboratory, USA. Report AFML-TR-79-4122 (1979) 1-74.
3. **Best** erosion protection with ERCoatnt [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.mtu.de/fileadmin/DE/7_News_Media/2_Media/Broschueren/Aero_Solutions/Best_erosion_protection_with_ERCoat.pdf (дата обращения 24.03.2017).
4. **Movchan B.A., Ustinov A.I.** Highly Damping Hard Coatings for Protection of Titanium Blades // In Evaluation, Control and Prevention of High Cycle Fatigue in Gas Turbine Engines for Land, Sea and Air Vehicles: Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-121, Paper 11. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. 2005. P. 11-1—11-16.
5. **Zhang S., Bui X.L., Fei Y.** Magnetron-sputtered n-TiC/a-C(Al) tough nanocomposite coatings // Thin Solid Films. 2004. Vol. 407. P. 261—266.
6. **Михрютина А.В., Кожина Т.Д.** Разработка оптимальной структуры и химического состава демпфирующих покрытий лопаток ГТД // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьёва. 2017. № 1 (40). С. 109—113.
7. **Михрютина А.В.** Обоснование выбора химического состава износостойких покрытий режущего инструмента на основе учета энергетических параметров контактных взаимодействий: Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2003. 168 с.

В.Ф. Безъязычный, С.В. Морскова

(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)

E-mail: technology@rgata.ru

Определение расчетного натяга при сборке неподвижных неразъемных соединений с учетом параметров качества поверхностного слоя соединяемых деталей и особенностей процесса обработки резанием

Рассмотрено влияние наклепа поверхностного слоя на прочностные характеристики соединения деталей с натягом. Предложена последовательность расчетов, позволяющая определять расчетный натяг с учетом совокупного влияния шероховатости и степени наклепа соединяемых поверхностей и в зависимости от режимных условий обработки, а также геометрии режущего инструмента и свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Ключевые слова: натяг, наклеп, продольно-прессовые соединения, шероховатость поверхности, модуль упругости материала, процесс резания.

The influence of work hardening of the surface layer on the strength characteristics of the connection details with tightness is considered. A sequence of calculations, allowing to determine the amount of estimated interference due to the combined effects of roughness and degree of work hardening of the mating surfaces and depending on the operating conditions of the treatment, as well as cutting tool geometry and properties of treated and tool materials is offered.

Keywords: tightness, hardening, longitudinal press-fit connection, surface roughness, modulus of elasticity of the material, cutting process.

Надежную работу изделий, и в частности газотурбинных двигателей (ГТД), во многом определяет качество прессовых соединений, которые достаточно широко применяются в конструкциях узлов ГТД. Основное назначение соединения — передача крутящего момента и осевой силы от одной детали к другой с использованием сил трения. К показателям качества прессовых соединений относятся статическая и динамическая прочность, жесткость, несущая способность (прочность сцепления). Улучшение качественных показателей прессовых соединений в настоящее время сдерживается отсутствием научно обоснованных методик расчета их эксплуатационных свойств, выбора и нормирования параметров качества рабочих поверхностей в зависимости от технологических факторов процесса их изготовления.

Требуемые прочностные характеристики сборочных единиц зависят от физико-механических свойств материалов деталей, их геометрических размеров, вида сборки и от параметров качества обработанной поверхности (шероховатости, степени наклепа, остаточных напряжений), которые, в свою очередь, зависят от технологических ус-

ловий обработки (свойств обрабатываемого и инструментального материалов, режимов обработки: подачи, глубины и скорости резания) [1].

Прочность соединений с натягом во многом зависит от шероховатости поверхностей. При запрессовке детали наблюдается сглаживание микронеровностей, приводящее к уменьшению фактического натяга. В связи с этим уменьшение прочности соединения деталей имеет место при более шероховатых поверхностях. В настоящее время расчет соединений с натягом выполняется по известным классическим формулам с использованием справочных данных, как правило, с учетом шероховатости контактируемых поверхностей.

Однако помимо шероховатости соединяемых поверхностей на прочность соединений с натягом оказывает влияние упрочнение поверхностного слоя (наклеп). При обработке под действием силы резания в поверхностном слое материала заготовки возникают упругие и пластические деформации. Пластическое деформирование материала сопровождается его упрочнением (наклепом) и изменением его механических, физических и химических свойств. В результате наклепа зерна

металла измельчаются, и он становится более прочным и твердым. Если при этом не происходит разрушение материала поверхностного слоя, наклеп может оказывать положительное влияние. При наклепе также возможно разрушение кристаллической решетки, которое внешне проявляется в задирах, надрывах и других дефектах обработанной поверхности. В этом случае уменьшается предел усталостной прочности и деталь может преждевременно разрушиться.

При всех видах механической обработки поверхности деталей оказываются наклепанными. На степень и глубину наклепа оказывают влияние:

свойства обрабатываемого материала — чем мягче и пластичнее материал, тем выше степень наклепа;

параметры режима резания — с увеличением скорости резания степень и глубина наклепа уменьшаются, а с увеличением глубины резания и подачи глубина наклепа возрастает;

геометрия инструмента — чем больше угол резания и радиус округления режущей кромки, тем больше степень наклепа;

износ инструмента — с увеличением износа лезвия повышается пластическая деформация. При работе инструментом с износом глубина наклепа увеличивается вдвое и более;

смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) — уменьшают наклеп.

Можно сделать вывод, что вследствие наклепа твердость поверхностного слоя в сравнении с первоначальной повышается у деталей из алюминия на 90...100 %; латуни на 60...70 %; мягкой конструкционной и аустенитной сталей на 40...50 %; твердой конструкционной стали на 20...30 %.

Наклеп поверхностного слоя оценивается глубиной h_n и степенью наклепа N .

Степень наклепа N , %, определяется по формуле [2]

$$N = \frac{h_n}{1,25(\sigma_b/\sigma_{b\text{э}})^{0,8}} \cdot 100, \quad (1)$$

где h_n — глубина наклепа, мкм; σ_b — предел прочности материала обрабатываемой детали, МПа; $\sigma_{b\text{э}}$ — предел прочности электротехнической стали, МПа.

Глубина наклепа h_n , мм, определяется по формуле

$$h_n = \frac{2,36 \cdot 10^{-8} \tau_p^{0,75} S^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35}}{\sqrt{0,28} r^{3,5} S^{1,7} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}, \quad (2)$$

где τ_p — сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па; S — подача, м/об;

t — глубина резания, м; ρ_1 — радиус округления режущей кромки инструмента, м; r — радиус при вершине резца в плане, м; α , γ — задний и передний углы резца соответственно, °; φ — главный угол резца в плане, °; v — скорость резания, м/с.

В связи с рассмотренным влиянием наклепа на прочность деталей разработаны рекомендации по расчетному определению номинального натяга с учетом как шероховатости контактируемой поверхности, так и степени ее упрочнения (наклепа) [3]. Также разработаны рекомендации по расчетному определению номинального натяга в зависимости от режимных условий обработки, а также геометрии режущего инструмента и свойств обрабатываемого и инструментального материалов [1].

Наиболее распространенным способом сборки прессовых соединений является продольно-прессовое соединение, поскольку получение подобных соединений является достаточно простым (рис. 1).

Прочность прессового соединения определяется расчетным натягом δ_p (формула Ляме) [1],

$$\delta_p = \frac{P_o}{\pi l f_{oc}} \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right). \quad (3)$$

Здесь l — длина контакта сопрягаемых поверхностей; f_{oc} — коэффициент трения при осевом сдвиге [4]; C_1 , C_2 — величины, зависящие от номинальных размеров сопрягаемых деталей и коэффициентов Пуассона материалов этих деталей [4]; E_1 , E_2 — модули упругости материалов охватываемой и охватывающей деталей; P_o — осевая сила, выдерживаемая соединением, которая определяется по формуле [4]

$$P_o = \pi d^2 l p f_{oc}, \quad (4)$$

где p — давление на поверхности контакта; d — номинальный диаметр соединения.

Для анализа совокупного влияния шероховатости и степени наклепа на прочность посадки с натягом была получена формула для определения давления на поверхности контакта с учетом высоты неровностей сопрягаемых поверхностей и степени наклепа на их поверхностях [1]

$$p = \frac{1}{d} [\delta_n - 1, 2(Rz_1 + Rz_2)] \sqrt{\frac{C_1 W_1}{2(1 + \mu_1) \left(\frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1} \right)^2} + \frac{C_2 W_2}{2(1 + \mu_2) \left(\frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2} \right)^2}}, \quad (5)$$

где δ_n — номинальный натяг, выбираемый из таблицы для конкретного соединения или задаваемый на чертеже изделия; C_1, C_2 — безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств материалов сопрягаемых деталей; μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей; Rz_1 и Rz_2, W_1 и W_2, α_1 и α_2, N_1 и $N_2, \sigma'_{0,2}$ и $\sigma''_{0,2}$ — значения высоты неровностей сопрягаемых поверхностей, накопленной энергии, параметра междислокационного воздействия, степени наклепа и условного предела текучести соответственно для материалов первой и второй сопрягаемых деталей.

Исследованиями установлено, что модуль упругости материала детали вследствие воздействия на него в процессе обработки теплового и силового факторов изменяется [5]. При механической обработке модуль упругости материала поверхностного слоя детали $E_{обр}$ определяется зависимостью

$$E_{обр} = CA^K, \quad (6)$$

где C и K — величины, зависящие от материала обрабатываемой детали [2]; A — энергетический критерий подобия процесса резания, который определяется по формуле профессора С.С. Силина [6]

$$A = \frac{1}{\frac{2,85E^{0,1}}{B^{0,43} \sin^{0,05} \alpha} + 0,6625 \frac{\Gamma D^{0,3} E^{0,175}}{B \sin^{0,165} \alpha}}, \quad (7)$$

где $B = va_1/a$ — безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень влияния режимных условий процесса резания по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала; v — скорость резания, м/с; a_1 — толщина среза, м; a — температуропроводность обрабатываемого материала, м²/с; $\Gamma = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \varepsilon$ — безразмерный комплекс, отражающий влияние геометрии инструмента и соотношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов; λ, λ_p — теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, Вт/(м·К); β, ε — угол заострения и угол при вершине резца в плане, рад; $D = a_1/b_1$ — безразмерный комплекс, характеризующий геометрию сечения среза; b_1 — ширина среза; $E = \rho_1/a_1$ — безразмерный комплекс, характеризующий влияние на процесс резания геометрической формы режущей кромки резца; ρ_1 — радиус округления режущей кромки резца, м; α — задний угол резца.

Удельная энергия W , Дж/мм³, определяется по формуле [7]

$$W = \frac{Q}{\alpha'^2 G} \left(\frac{h_n \sigma_{0,2}}{1,25(\sigma_B/\sigma_{B\vartheta})^{0,8}} \right)^2, \quad (8)$$

где Q — коэффициент пропорциональности, $Q = 0,5...1$; α — параметр междислокационного воздействия в поверхностном слое детали; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала, МПа; G — модуль сдвига, который с учетом модуля упругости материала поверхностного слоя детали после обработки $E_{обр}$ определяется по формуле

$$G = \frac{E_{обр}}{2(1 + \mu)}, \quad (9)$$

где μ — коэффициент Пуассона материала детали.

С использованием представленной выше последовательности расчетов определены значения расчетного натяга δ_p с учетом совокупного влияния шероховатости и степени наклепа соединяемых поверхностей и в зависимости от режимных условий обработки, а также геометрии режущего инструмента и свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Для расчета была принята схема продольно-прессового соединения (см. рис. 1), где вал выполнен из жаропрочного материала ХН50МВКТИОР-ИД (ЭП99-ИД) по ТУ 14-1-1476—75), втулка — из жаропрочного материала ХН56ВМКЮ-ВД (ЭП109-ВД) по ГОСТ 23705—79, инструментальный материал — ВК6М (ГОСТ 3882—74) (табл. 1).

Размеры соединения: диаметр отверстия охватываемой детали $d_0 = 106$ мм; номинальный диа-

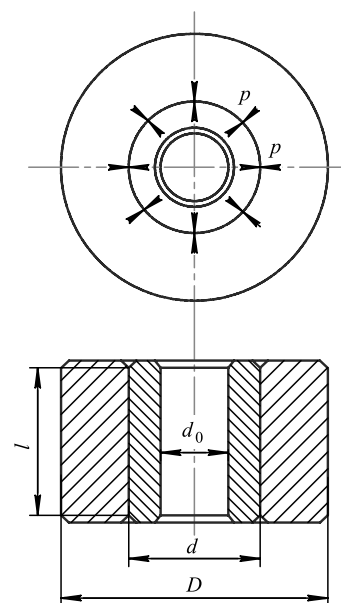


Рис. 1. Схема продольно-прессового соединения

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов сопрягаемых деталей

Характеристика	ЭП99-ИД	ЭП109-ВД
Предел прочности σ_B , МПа	1150	1220
Предел прочности $\sigma_{B\text{э}}$, МПа	750	750
Коэффициент Пуассона μ	0,3	0,3

метр сопрягаемых поверхностей $d = 100$ мм; диаметр наружной поверхности охватывающей детали $D = 94$ мм; номинальный натяг в соединении $\delta_H = 0,3$ мм.

Параметры режущего инструмента: главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 15^\circ$; задний угол $\alpha = 7^\circ$; передний угол

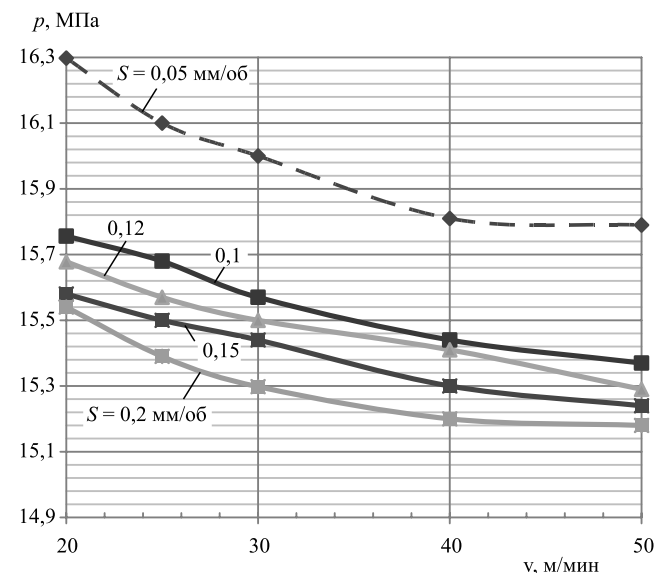


Рис. 2. Зависимость давления на поверхности контакта от скорости резания

$\gamma = 10^\circ$; радиус при вершине $r = 1$ мм; радиус заострения режущей кромки $\rho = 30$ мкм. Режимы резания: глубина резания $t = 0,5$ мм; подача S — 0,05, 0,1, 0,12, 0,15 и 0,2 мм/об (рассматриваются пять вариантов подачи для каждой детали); скорость резания v — 20, 30, 50, 60 и 80 м/мин (рассматриваются пять вариантов скорости резания для каждой детали). Для каждого значения подачи принимаются разные значения скорости резания. Полученные значения давления на поверхности контакта p и расчетного натяга δ_p с учетом совокупного влияния шероховатости и степени наклепа соединяемых поверхностей и в зависимости от режимных условий обработки, а также геометрии режущего инструмента и свойств обрабатываемого и инструментального материалов представлены в табл. 2 и на рис. 2, 3.

Проанализировав графики, приведенные на рис. 2, 3, можно сделать следующие выводы:

с увеличением скорости резания и подачи уменьшается давление на поверхности контакта;

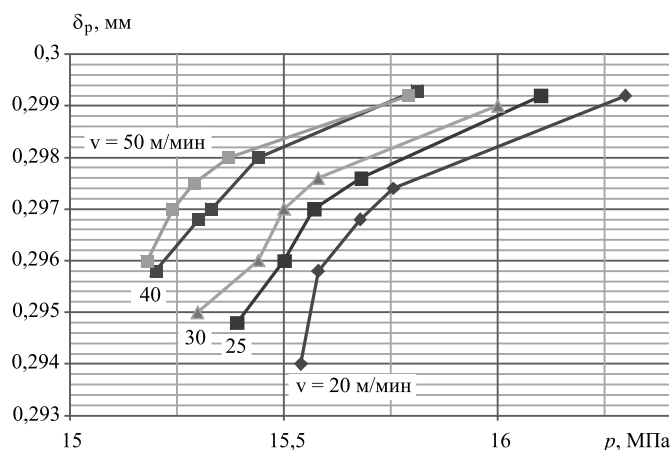


Рис. 3. Зависимость расчетного натяга от давления на поверхности контакта

Таблица 2

Значения давления на поверхности контакта и расчетного натяга

v , м/мин	$S = 0,05$ мм/об		$S = 0,1$ мм/об		$S = 0,12$ мм/об		$S = 0,15$ мм/об		$S = 0,2$ мм/об	
	p , МПа	δ_p , мм	p , МПа	δ_p , мм	p , МПа	δ_p , мм	p , МПа	δ_p , мм	p , МПа	δ_p , мм
20	16,298	0,2992	15,756	0,2974	15,678	0,2968	15,58	0,2958	15,54	0,294
25	16,1	0,2992	15,68	0,2976	15,57	0,297	15,5	0,296	15,39	0,2948
30	16	0,299	15,57	0,2976	15,5	0,297	15,44	0,296	15,298	0,295
40	15,81	0,2993	15,44	0,298	15,41	0,297	15,3	0,2968	15,2	0,2958
50	15,79	0,2992	15,37	0,298	15,29	0,2972	15,24	0,297	15,18	0,296

с увеличением давления на поверхности контакта и подачи увеличивается расчетный натяг.

Таким образом, разработана методика определения расчетного натяга с учетом шероховатости соединяемых деталей и поверхностного упрочнения, которое оказывает влияние на прочность деталей, а также с учетом особенностей процесса резания. Следовательно, значение расчетного натяга, полученное с использованием разработанной последовательности расчетов, является наиболее обоснованным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Безъязычный В.Ф., Чугуевская С.В.** К вопросу определения расчетного натяга при сборке неподвижных неразъемных соединений // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докл. Междунар. науч.-техн. конф. (22–24 июня 2016 г.). В 2 ч. Самара, Самарский университет, 2016. Ч. 2. С. 185–187.
2. **Безъязычный В.Ф.** Теория подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
3. **Безъязычный В.Ф., Федулов В.М., Чугуевская С.В.** К вопросу расчетного определения прочностных характеристик сборочных соединений с натягом с учетом шероховатости поверхностей собираемых деталей и степени их наклепа // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 4. С. 21–26.
4. **Сборка** и монтаж изделий машиностроения: справочник / Ред. совет: В.С. Корсаков (предс.) и др.; под ред. В.С. Корсакова, В.К. Замятина. В 2 т. М.: Машиностроение, 1983. 480 с.
5. **Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф.** Свойства сплавов в экстремальном состоянии. М.: Машиностроение, 2004. 256 с.
6. **Силин С.С.** Теория подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
7. **Виноградова Н.В.** Определение параметров качества поверхностного слоя после механической обработки с учетом дислокационных и структурно-фазовых превращений: Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2003.

УДК 621.9

В.Ф. Безъязычный

(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва),

М.В. Басков

(АО "Конструкторское бюро "Луч", г. Рыбинск)

E-mail: technology@rsatu.ru

Влияние покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей

Исследовано влияние износостойких покрытий режущего инструмента на параметры процесса резания и параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей: остаточные напряжения, степень и глубину наклепа поверхностного слоя, шероховатость поверхности.

Ключевые слова: износостойкое покрытие, качество поверхностного слоя, коэффициент трения, остаточные напряжения, степень и глубина наклепа, шероховатость поверхности.

The influence of wear-resistant coatings of cutting tools on the parameters of cutting process and parameters of the quality of the surface layer of the machined parts has been studied: residual stresses, the degree and depth of hardening of the surface layer, surface roughness.

Keywords: wear-resistant coating, quality of the surface layer, friction coefficient, residual stresses, degree and depth of hardening, surface roughness.

Введение

При изготовлении деталей газотурбинных двигателей (ГТД), относящихся к категории ответ-

ственных (валов, дисков, корпусов компрессоров и др.), преимущественно используются операции механической обработки, в частности обработка

точением. К сожалению, до настоящего времени недостаточно изучены закономерности влияния широко применяемых в производстве покрытий режущих инструментов на механизмы формирования параметров, характеризующих качество поверхностного слоя, и эксплуатационные свойства деталей ГТД. Между тем учет их влияния на процесс резания позволит более точно определять параметры, характеризующие качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей ГТД.

В наукоемком производстве используются инструменты с износостойкими покрытиями. Их применение оказывает влияние на трибологические характеристики процесса резания, тепловыделение, силу резания и, как следствие, на параметры качества поверхностного слоя детали и ее эксплуатационные свойства. Покрытия инструмента существенно изменяют параметры процесса резания: они уменьшают длину контакта стружки с поверхностями режущего инструмента, силу резания, снижают температуру в зоне резания и деформацию срезаемого припуска, увеличивают угол схода стружки.

Содержание исследования

Влияние покрытий режущего инструмента на качество поверхностного слоя обработанных деталей проявляется через изменение в зоне резания температуры и сил резания.

Температуру резания θ определяли по интегральным зависимостям при действии объемных источников тепла [1]. Были выполнены расчеты температуры резания для вариантов действия плоских и объемных источников тепла. Рассматривалась обработка заготовки диаметром 98 мм при различных скоростях резания (сплав ХН77ТЮР (ЭИ437Б); глубина резания 1 мм; подачи: 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 мм/об; резец с пластиной из твердого сплава ВК6 с геометрией режущей части: $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 5^\circ$; $\rho = 10$ мкм; $r = 1$ мм; $\phi = 45^\circ$; $\phi_1 = 15^\circ$). В результате сопоставления экспериментальных данных и результатов расчета по каждому из рассматриваемых вариантов установлено, что при увеличении подачи температура резания с учетом действия плоских источников тепла значительно меньше экспериментального значения (рис. 1).

Результаты расчетов показали, что покрытия режущего инструмента (TiSiAl)N и Al_2O_3 значительно снижают температуру резания по срав-

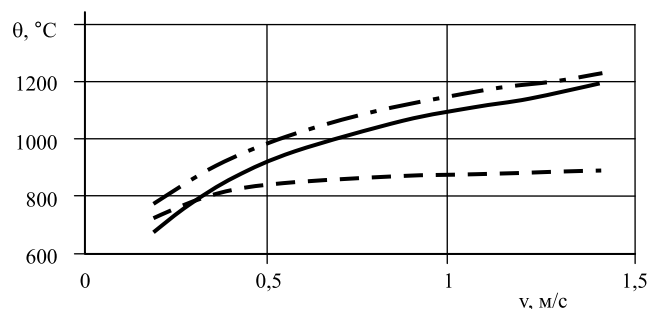


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные значения температуры в зоне резания при обработке детали из сплава ЭИ437Б (подача 0,3 мм/об):

— экспериментальное значение температуры резания, $\theta_{экс}$; - - - температура резания, рассчитанная с учетом действия плоских источников тепла, $\theta_{пл}$; -·- температура резания, определенная с учетом действия объемных источников тепла, $\theta_{об}$

нению с инструментом без покрытия при точении образцов из коррозионно-стойкой стали 05X12H2K3M2AФ (ЭК26). Разница достигает 25 % при скорости резания 1,4 м/с и подаче 0,2 мм/об (рис. 2). При этом влияние покрытия (TiSi)N на температуру в зоне резания значительно ниже.

При обработке жаропрочного сплава ЭИ437Б покрытия режущего инструмента значительно меньше снижают температуру в зоне резания в отличие от обработки аналогичных образцов из ЭК26. Различие в характере влияния покрытий режущего инструмента на значения температуры в зоне резания при обработке образцов из ЭК26 и

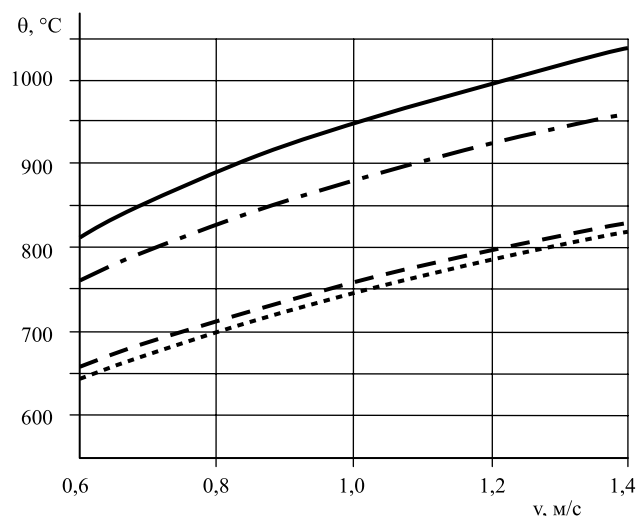


Рис. 2. Температура резания при обработке образцов из коррозионно-стойкой стали ЭК26 (подача 0,2 мм/об):

— инструмент из ВК6 без покрытия; - - - с покрытием (TiSi)N; -·- с покрытием (TiSiAl)N; ···· с покрытием Al_2O_3

ЭИ437Б объясняется различием в тепловой интенсивности источников деформации и трения по передней поверхности инструмента.

Применение покрытий режущего инструмента (TiSi)N, Al₂O₃ при обработке образцов из коррозионно-стойкой стали ЭК26 заметно снижает силу резания P_z по сравнению с вариантом обработки инструментом без покрытия (различие значений достигает 15 %). Применение покрытия (TiSiAl)N несущественно снижает силу резания P_z . Применение покрытий режущих инструментов при обработке жаропрочного сплава ЭИ437Б практически не оказывает влияния на силу резания P_z .

Причиной снижения силы резания P_z при применении покрытий является изменение коэффициента укорочения стружки, напрямую зависящего от безразмерного комплекса процесса резания $B = 1/\text{tg}\beta_1$, где β_1 — угол наклона условной плоскости сдвига стружки, и изменения адгезионных процессов в зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов.

Были выполнены эксперименты для сопоставления расчетных и экспериментальных значений сил и температур в зоне резания при обработке образцов из стали ЭК26. Технологические условия проведения эксперимента следующие: глубина резания 1 мм; скорость резания 1,3 м/с; по-

дача 0,07, 0,14 и 0,2 мм/об; задний угол $\alpha = 15^\circ$; передний угол $\gamma = 5^\circ$; радиус при вершине резца $r = 1$ мм; главный и вспомогательный углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$.

Инструментальным материалом при проведении экспериментальных исследований был твердый сплав МС321 (аналог ВК6) без покрытия и твердый сплав МС321 с нанесенными нитридными наноструктурированными покрытиями (TiSiAl)N и (TiSi)N.

Температуру резания определяли на основе замера термо-ЭДС естественной термопары заготовка — резец. Составляющие сил резания P_z , P_y и P_x регистрировали универсальным динамометром УДМ-600.

При проведении эксперимента были сделаны замеры значения силы резания P_z и температуры резания θ (табл. 1). Расчетные значения и результаты проведенных экспериментов имеют хорошую степень корреляции (коэффициент Пирсона равен 0,63).

Изучено также влияние покрытий режущих инструментов на величину остаточных напряжений, степень и глубину наклепа, значение параметра шероховатости поверхности R_z .

При обработке образцов из жаропрочного сплава ЭИ437Б выявлено незначительное влияние покрытий режущих инструментов на величину суммарных остаточных напряжений. При обработке коррозионно-стойкой стали ЭК26 все рассматриваемые покрытия значительно снижают величину остаточных напряжений и глубину их залегания. В частности, при использовании покрытия Al₂O₃ и подаче 0,14 мм/об глубина залегания у неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений снижается на 35 % (рис. 3).

Причиной различия в величинах и глубинах залегания остаточных напряжений являются разные значения коэффициентов трения сочетания деталь — инструмент, приводящие к изменению внутреннего трения и течения поверхностных слоев обрабатываемой детали, а также влияние температурного фактора [2].

Для оценки точности результатов теоретических расчетов, выполненных с помощью разработанного программного обеспечения, были проведены эксперименты по обработке точением образцов из коррозионно-стойкой стали ЭК26 с последующим определением параметров качества поверхностного слоя. Технологические условия проведения эксперимента приведены выше. В качестве исследуемого инструментального ма-

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения силы резания P_z и температуры резания θ при чистовом точении образцов из стали ЭК26 (глубина резания $t = 1$ мм; скорость резания $v = 1,3$ м/с)

Подача, мм/об	Покрытие	Экспериментальные значения		Расчетные значения	
		P_z , Н	θ , °С	P_z , Н	θ , °С
0,07	Отсутствует	203	701	230	780
	(TiSiAl)N	185	660	220	750
	(TiSi)N	170	620	198	650
0,14	Отсутствует	380	850	392	950
	(TiSiAl)N	360	797	375	880
	(TiSi)N	350	758	334	760
0,2	Отсутствует	493	940	525	1010
	(TiSiAl)N	460	844	480	940
	(TiSi)N	452	794	440	815

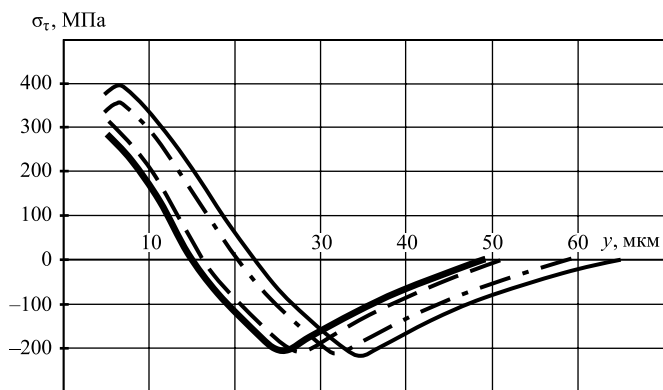


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений при обработке образцов из коррозионно-стойкой стали ЭК26 (подача 0,14 мм/об), полученные с помощью имитационного моделирования остаточных напряжений: — инструмент без покрытия; - - - с покрытием (TiSi)N; - · - с покрытием (TiSiAl)N; — с покрытием Al₂O₃

териала рассматривались твердый сплав МС321 (аналог ВК6) без покрытия и твердый сплав МС321 с нитридными наноструктурированными покрытиями (TiSiAl)N и (TiSi)N. Эпюры остаточных напряжений представлены на рис. 4. Значения расчетных остаточных напряжений показывают достаточно хорошее совпадение с полученными в эксперименте.

Значения параметров шероховатости и наклепа приведены в табл. 2 и 3; значения остаточных напряжений — в табл. 4.

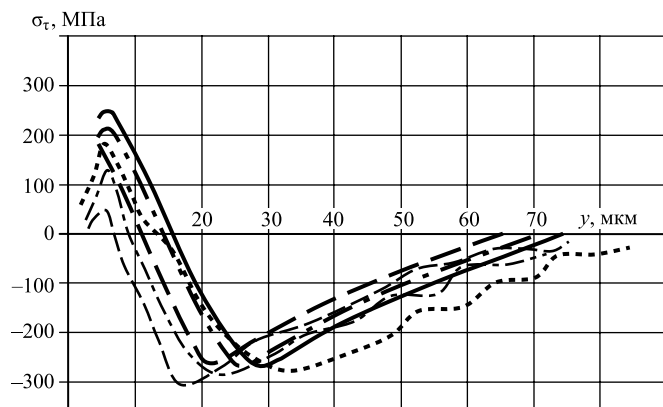


Рис. 4. Эпюры остаточных напряжений при точении образца из стали ЭК26 (подача 0,2 мм/об) инструментом из МС321: — без покрытия (ВК6), расчет; - - - с покрытием (TiSiAl)N, расчет; - · - с покрытием (TiSi)N, расчет; · · · · без покрытия (ВК6), эксперимент; - - - с покрытием (TiSiAl)N, эксперимент; - - - с покрытием (TiSi)N, эксперимент

На параметр шероховатости R_z обработанной поверхности применение покрытий (TiSi)N и (TiSiAl)N в целом влияет положительно. R_z обработанной поверхности при использовании покрытия (TiSi)N снижается на 10 %. Покрытие режущего инструмента Al₂O₃ не оказывает практически никакого влияния на шероховатость обработанной поверхности (см. табл. 2).

Глубина и степень наклепа значительно зависят от применения покрытий Al₂O₃, (TiSi)N,

Таблица 2

Параметр шероховатости поверхности R_z , мкм

Покрытие	Подача, мм/об		
	0,07	0,14	0,2
Отсутствует	0,6	2,1	3,9
(TiSi)N	0,5	1,7	2,4
(TiSiAl)N	0,5	2,0	3,0
Al ₂ O ₃	0,6	2,0	3,5

Таблица 3

Глубина наклепа h , мкм

Покрытие	Подача, мм/об		
	0,07	0,14	0,2
Отсутствует	8	18	24
(TiSi)N	6	11	14
(TiSiAl)N	6	11	14
Al ₂ O ₃	5	11	14

Таблица 4

Максимальные значения неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое, МПа

Покрытие	Подача, мм/об		
	0,07	0,14	0,2
Отсутствует	510	400	250
(TiSi)N	420	320	190
(TiSiAl)N	470	360	220
Al ₂ O ₃	400	290	170

(TiSiAl)N, при этом покрытие Al_2O_3 позволяет снизить значения глубины и степени наклепа обработанной поверхности на 40 % по сравнению со значениями, полученными при использовании аналогичного твердосплавного инструмента без покрытия (см. табл. 3).

Заключение

1. Покрытия режущего инструмента оказывают благоприятное влияние на параметры качества поверхностного слоя детали, уменьшая степень и глубину наклепа, глубину залегания остаточных

напряжений, а также шероховатость обработанной поверхности.

2. Чем ниже коэффициент трения в зоне резания и меньше толщина износостойкого покрытия режущего инструмента (острее режущие кромки), тем сильнее благоприятное влияние покрытия на параметры качества поверхностного слоя детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Безъязычный В.Ф.** Метод подобию в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 317 с.
2. **Шустер Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.

Продолжается подписка на журнал "Упрочняющие технологии и покрытия"

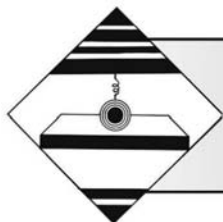
За наличный и безналичный расчет
С любого номера и на любой срок
Без почтовых наценок

Присылайте заказы и обращайтесь за дополнительной информацией
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Тел.: (495) 785-60-69

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru



УДК 621.7

В.Ф. Безъязычный, М.А. Прокофьев
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва),
С.Н. Бардинова
(ПАО "Научно-производственное объединение "Сатурн", г. Рыбинск)
E-mail: tehnology@rsatu.ru

Расчетное определение параметров упрочнения материала поверхностного слоя деталей при механической обработке

Рассмотрен вариант расчетного определения степени и глубины наклепа поверхностного слоя деталей машин после механической обработки с учетом совместного влияния на поверхностный слой теплового и силового воздействий, обусловленных механической обработкой. Приведены расчетные зависимости для определения глубины и степени наклепа.

Ключевые слова: механическая обработка лезвийным инструментом, дробеструйное упрочнение, глубина наклепа, степень наклепа, накопленная энергия, технологические условия обработки, физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов.

The article considers the calculation of the degree and depth of the hardening of the surface layer of machine parts after machining, taking into account the joint influence of thermal and force impacts on the surface layer due to machining. Settlement dependences for determination of depth and degree of hardening are given.

Keywords: machining by cutting tool, shot-blasting, depth of hardening, degree of hardening, stored energy of deformation, technological conditions of processing, physical and mechanical properties of processed and instrumental materials.

Введение

Упрочнение поверхностного слоя деталей машин, в том числе вызванное механической обработкой, в ряде случаев оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей и изделий в целом, к которым относятся прочность, износостойкость, контактная жесткость, коррозионная стойкость и др. Исследованиями А.М. Сулимы, В.С. Мухина и других ученых установлено, что влияние наклепа в поверхностном слое на прочность жаропрочных сплавов двойственно:

при работе деталей в области сравнительно низких температур при относительно небольшом ресурсе эксплуатации наклеп повышает сопротивление жаропрочных сплавов разрушению, что связано с повышением сопротивления отрыву в результате структурных изменений под влиянием пластической деформации;

с повышением температуры и длительности ресурса эксплуатации наклеп способствует интенсификации процессов изменения состава материала в результате окисления, выгорания и испарения легирующих элементов, что может приводить к охрупчиванию и потере жаропрочности.

Считается, что для деталей из жаропрочных сталей и сплавов, работающих при высоких температурах, желателен поверхностный слой без наклепа или с весьма незначительным наклепом, который должен устанавливаться в зависимости от рабочей температуры.

В связи с этим одним из важных направлений исследования степени и глубины наклепа поверхностного слоя после механической обработки является расчетное определение параметров упрочнения поверхностного слоя.

Глубина наклепа обработанной поверхности, как доказано рядом исследований, определяется глубиной залегания пластических деформаций в поверхностном слое. В соответствии с условием пластичности Хубера—Мизеса пластические деформации в поверхностном слое возникают при создании напряжений, равных пределу текучести [1].

Возникновение пластических деформаций в поверхностном слое обусловлено одновременным воздействием температуры и силы резания, поэтому глубина залегания пластических деформаций должна определяться из условия равенства пределу текучести алгебраической суммы напряжений, обусловленных силовым и тепловым воздействиями. Для получения расчетных зависимостей были проанализированы закономерности влияния технологических факторов исходя из условий возникновения наклепа как от отдельного, так и от совместного действия температуры и силы резания.

Содержание исследования

Суммарная глубина наклепа определяется из условия одновременных теплового и силового воздействий на поверхностный слой обрабатываемой детали, т. е. расстоянием от поверхности детали до слоя, где соблюдается условие

$$\sigma_y + \sigma_n = -\sigma_T, \quad (1)$$

где σ_y — напряжения, обусловленные силовым воздействием на поверхностный слой обрабатываемой детали; σ_n — напряжения, обусловленные тепловыми воздействиями на поверхностный слой; σ_T — предел текучести обрабатываемого материала.

При обработке деталей типа диск напряжения σ_n определяется по формуле [2]

$$\sigma_n = -\frac{\beta_g A_1 E_g}{1 - \mu} \left\{ \left[\frac{H - y + a_1}{a_1} \right]^{x_2} + \frac{1}{(1 + x_2) a_1^{x_2}} \left[a_1^{x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] \right\}. \quad (2)$$

Здесь β_g — коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого материала; E_g и μ — модуль упругости, Па, и коэффициент Пуассона материала детали соответственно; H — толщина детали, м; a_1 — толщина среза, м; y — глубина залегания слоя, в котором определяется σ_n ; A_1 — величина, определяемая по формуле

$$A_1 = C_0 \theta_A (БВ)^{x_1} \left(\frac{\rho_1}{a_1} \right)^{x_3 - d} \times (\sin \alpha)^{0,005 - 0,042x_4} (\sin \gamma)^{-0,021x_4},$$

где C_0, x_1, \dots, x_4, d — величины, зависящие от сочетания свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии режущей части инструмента, режима обработки [2]; $Б = va_1/a$ — безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень влияния режимных условий обработки по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала; a — температуропроводность обрабатываемого материала, м/с²; v — скорость резания, м/с; $В = 1/\text{tg}\beta_1$ — безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень пластических деформаций снимаемого припуска и материала поверхностного слоя обрабатываемой детали; β_1 — угол наклона условной плоскости сдвига материала снимаемого припуска; α, γ — задний и передний углы резца, °; ρ_1 — радиус округления режущей кромки резца, м; θ_A — температура на условной вершине резца, °С [3],

$$\theta_A = \frac{\tau_p}{c_p B} \text{erf} \sqrt{\frac{БВ}{4}};$$

τ_p — сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па; c_p — удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м³·К).

Напряжения, обусловленные силовым воздействием, определяются по формуле [2]

$$\begin{aligned}
 \sigma_y = & -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \frac{1 + B + B \operatorname{tg}(\arctg B - \gamma)}{\left[B \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B\right) \right] \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B\right)} \times \right. \\
 & \times \left[2 \arccos \frac{B + B \frac{y}{a_1}}{\sqrt{1 + \left(B + B \frac{y}{a_1}\right)^2}} - \sin 2\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B\right) + \right. \\
 & \left. \left. + \left[2 \left(B + B \frac{y}{a_1}\right) \left[2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B\right) - 1 \right] + \sin 2\left(\frac{\pi}{2} - \arctg B\right) \left[\left(B + B \frac{y}{a_1}\right)^2 - 1 \right] \right] / \left[1 + \left(B + B \frac{y}{a_1}\right)^2 \right] \right\} \times \\
 & \times \frac{1}{1 - \mu} - \frac{\tau_p b}{2\pi b_1 \cos \alpha} \left\{ -\frac{\tau_p b}{2\pi b_1 \cos \alpha} \left[\frac{2}{\sin 2\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B + \gamma\right)} \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta}{\Delta_1} \frac{B}{y}\right)^2}} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + 1 - \frac{\pi}{2} \frac{2 - \frac{\pi}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta}{\Delta_1} \frac{B}{y}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta}{\Delta_1} \frac{B}{y}\right)^2}} + \frac{2}{\operatorname{tg} 2\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B + \gamma\right)} \frac{\frac{\pi}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta}{\Delta_1} \frac{B}{y}\right)^2} - 1}{1 + \left(\frac{\Delta}{\Delta_1} \frac{B}{y}\right)^2} \right\} \frac{1}{1 - \mu^2}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где Δ , Δ_1 — размеры источников тепла направления подачи [2],

$$\begin{aligned}
 \Delta = & \arccos \left[1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}} \right] + \\
 & + \frac{a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}}}{\sin \alpha \cos \alpha + B \sin \gamma} + \frac{\delta}{\rho_1}; \Delta_1 \frac{a_1}{B};
 \end{aligned}$$

δ — длина площадки износа резца по задней поверхности режущего инструмента, м; a_2 , b_2 , x — значения, зависящие от безразмерного комплекса B [2]; b_1 , b — ширина среза и длина контакта режущей части инструмента с обрабатываемым материалом соответственно, м.

Решая уравнения (1)...(3) относительно $y = h_n$, получим значения глубины наклепа в поверхностном слое детали после обработки с учетом режимных условий обработки, геометрии инструмента, физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Математическая обработка результатов расчетов глубины наклепа на ЭВМ позволила получить упрощенное теоретическое выражение для определения глубины наклепа h_n , м, при точении жаропрочных сталей и сплавов

$$h_n = \frac{2,36 \cdot 10^{-8} \tau_p^{0,75} S^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35}}{\sqrt{0,28} r^{3,5} S^{1,7} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}},$$

Таблица 1

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений глубины наклепа при точении

Обрабатываемый/ инструментальный материалы	Технологические условия обработки							
	S, мм	v, м/с	r, мм	φ, °	α, °	Глубина наклепа h _н , мкм		Расхождение между расчетным и экспериментальным значениями h _н , %
						Расчет	Эксперимент	
ХН73МБТЮ/ВК8	0,1	0,5	1	45	10	92	80	+15
	0,2	0,5	1	45	10	150	120	+25
	0,15	0,5	1	45	10	134	120	+11,7
	0,15	0,5	0,5	45	10	116	100	+16
	0,2	0,37	2	45	15	150	120	+25
13Х12НВМ/Т15К6	0,2	1,57	1	45	12	70	75	-6,7
	0,1	1,26	1	45	12	60	48	+25
	0,3	1,57	1	45	12	85	100	-15
	0,1	1,57	1	45	12	55	45	+22
	0,1	1,98	1	45	12	52	48	-21
	0,1	0,79	1	45	12	52	49	+6

где τ_p — сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м²; S — подача, м/об; t — глубина резания, м; ρ₁ — радиус округления режущей кромки инструмента, м; v — скорость резания, м/с; φ — главный угол резца в плане, °; r — радиус при вершине резца в плане, м; α, γ — задний и передний углы резца, °.

Таблица 2

Зависимость коэффициента k от предела прочности обрабатываемого материала

Марка материала	σ _в /σ _{вэ}	k
Сталь Ст3	1	1,36
Сталь 10	1,12	1,38
Сталь 45	1,7	1,81
Сталь У12А	2,5	2,13
Сталь 13Х12НВМА	2,43	2,8
Сталь 15Х18Н12СЧТЮ	1,86	2,2
Сплав ХН70ФМТЮ (ЭИ617)	3,16	2,88
Сплав ХН73МБТЮ	3,2	3,8
Сталь 40Х	1,8	1,82
Сплав ХН77ТЮР	2,8	3,14
Сплав 13Х14Н3В2ФР (ЭИ736)	2	3,86

Формула справедлива для следующих условий обработки: t = 0,5...2 мм; S = 0,05...0,4 мм/об; v = 0,1...0,08 м/с (для ХН73МБТЮ и ХН77ТЮР); v = 0,5...4 м/с (для 13Х12НВМА); r = 0,5...2 мм; ρ₁ = 20...100 мкм; φ₁ = 15...90°; α = 5...20°; γ = 5...20°.

При наличии фаски износа резца по задней поверхности δ_{изн} = 0,1...1 мм

$$h_n = \frac{0,76 \cdot 10^{-6} \tau_p^{0,75} S^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35} \delta_{изн}^{0,36}}{v^{0,28} r^{3,55} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений глубины наклепа при точении приведено в табл. 1.

Между глубиной наклепа h_н и степенью наклепа N существует взаимосвязь h_н = kN, где k — коэффициент, значение которого зависит от марки обрабатываемого материала.

Анализ показал, что значения k имеют достаточно тесную корреляционную связь с пределом прочности обрабатываемого материала. С использованием значений k, приведенных в табл. 2, получена зависимость

$$k = 1,25 \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_{вэ}} \right)^{0,8},$$

где σ_{вэ} — предел прочности электротехнической стали, принятой за эталон.

Следовательно, формула для определения степени наклепа имеет вид

$$N = \frac{h_c}{1,25(\sigma_B/\sigma_{B\text{э}})^{0,8}}.$$

Для проверки этой формулы были проведены эксперименты по обработке резанием материалов ВТ9 и ХН73МБТЮ резцом из ВК8 при оптимальных скоростях резания, обеспечивающих минимум износа режущего инструмента. При обработке сплава ВТ9 скорость резания $v = 0,32/S^{0,6}$ м/с, а при обработке сплава ХН73МБТЮ $v = 0,18/S^{0,4}$ м/с, $t = 1$ мм, $\alpha = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\lambda = 0$; $r = 1$ мм. При обработке ХН73МБТЮ $\gamma = 10^\circ$, при обработке ВТ9 $\gamma = 0$. Результаты сопоставления значений степени наклепа, полученных в расчете и эксперименте, приведены в табл. 3.

Накопленная энергия деформации является параметром, определяющим свойства поверхностных слоев обработанной детали, так как трансформация свойств этих слоев относительно исходных является результатом изменения энергии межатомных или межмолекулярных связей.

Получена математическая зависимость, позволяющая рассчитывать удельную накопленную энергию деформации $W_{уд}$,

$$W_{уд} = \frac{Q}{\alpha^{0,2}G} \left(\frac{h_n \sigma_{0,2}}{1,25(\sigma_B/\sigma_{B\text{э}})^{0,8}} \right)^2. \quad (4)$$

Здесь Q — коэффициент, определяемый по формуле $Q = \frac{1}{4\pi k} \ln \frac{R}{r_0} \approx 0,5...1$, где R — внешний ограниченный радиус, который можно принять равным расстоянию между отдельными дислокациями или между скоплениями дислокаций, $R \approx 1$ мкм; k — коэффициент (для винтовой дислокации $k = 1$, а для краевой $k = (1 - \mu)$, μ — коэффициент Пуассона); r_0 — радиус внутреннего цилиндра (ядра дислокации), принимается равным половине вектора Бюргерса.

Успех расчета по зависимости (4) зависит от знания коэффициента α , который, как показывают исследования, изменяется в широких пределах. Авторами решена задача расчетного определения данного коэффициента. Ее решение основывается на закономерностях изменения накопленной энергии в зависимости от степени пластической деформации, температуры деформации и механических свойств обрабатываемых материалов (табл. 4).

Таблица 3

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени наклепа

Изменяемые параметры		Обрабатываемый материал					
		ХН73МБТЮ (ЭИ698-ВД)			ВТ9		
S, мм/об	ρ ₁ , мкм	N, %			N, %		
		Расчет	Эксперимент	Расхождение	Расчет	Эксперимент	Расхождение
0,1	20	36	31	14	22	14	36
0,1	30	41	43,5	6	30	18	40
0,1	50	50	50	0	44	41	7
0,25	20	73	—	—	33	32	3
0,25	30	78	50	36	40	41	2,5
0,25	50	88	57	35	55	54	2
0,4	30	112	75	33	50	69	38
0,4	50	121	99,5	18	65	97	33

Установлена взаимосвязь между удельной накопленной энергией деформации $W_{уд}$ и плотностью дислокаций Λ как на поверхности обрабатываемого материала, так и по глубине модифицированного слоя [4]:

$$\Lambda = \frac{W_{уд}}{0,75Gb^2}, \quad (5)$$

где b — вектор Бюргерса, м; G — модуль сдвига материала детали, Па.

Расчеты по формуле (5) плотности дислокаций на поверхности исследуемых материалов после механической обработки свидетельствуют о том, что пределы изменения поверхностной плотности дислокаций для различных исследованных металлов при различных видах механической обработки изменяются в пределах от $1 \cdot 10^{10}$ до $4 \cdot 10^{12}$ см⁻². Данный диапазон изменения рассматриваемой величины плотности дислокаций во многом повторяет результаты исследований различных авторов по экспериментальному определению плотности дислокаций, что позволяет сделать вывод об адекватности рассчитанных значений плотности дислокаций.

Для процессов механической обработки разработаны следующие зависимости для расчета абсо-

Таблица 4

Физико-механические свойства металлов и сплавов и коэффициент α

Материал	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-9}$, Па	Вектор Бюргера $b \cdot 10^{-10}$, м	Расчетный коэффициент α		
<i>Углеродистые стали</i>							
08	330	200	80	2,87	0,20		
10, 10кп	340	210			0,20		
15	380	225			0,22		
20, 20кп	410	250			0,22		
25	530	275			0,26		
30	540	320			0,26		
35	520	310			0,26		
40	570	320			0,26		
45	600	340			0,28		
50	630	350			0,28		
55	640	360			0,28		
<i>Легированные стали и сплавы</i>							
30Г	550	290			80	2,87	0,28
50Г	650	370	0,28				
60Г	700	380	0,30				
35Г2	630	370	0,28				
30Х	900	700	0,21				
50Х	1100	900	0,20				
20ХГ	800	600	0,23				
15Х	750	560	0,23				
40Х	1000	800	0,22				
50ХФА	1250	1080	0,20				
X18H9T	600	280	0,30				
H23H18	920	630	0,28				
12X18H9T	620	320	0,30				
<i>Жаропрочные сплавы</i>							
ХН77ТЮР	1020	660	80	3,5	0,34		
ХН70ВМТЮ	1140	750			0,34		
ХН73МБТЮ	1200	800			0,34		
ХН50ВМКТЮР	1220	785			0,35		
ХН70МВФ	800	370			0,39		
ХН62ВМКЮ	950	500			0,39		

лютной величины накопленной в поверхностном слое детали энергии деформации с учетом геометрии обработанной поверхности и упрочнения по глубине поверхностного слоя:

для плоского шлифования

$$W = \frac{QLB}{\alpha^2 G} \int_0^H [0,32(HV - HV_0)]^2 dH;$$

для цилиндрических поверхностей

$$W = \frac{2\pi dLQ}{\alpha^2 G} \int_0^H [0,32(HV - HV_0)]^2 dH,$$

где W — абсолютная величина накопленной энергии, Дж; L — длина обрабатываемой поверхности, м; B — ширина шлифования (ширина обработанной поверхности), м; HV_0 — микротвердость не затронутого пластической деформацией металла, Па; HV — микротвердость упрочненного участка металла на определенной глубине H от поверхности до глубины наклепа, Па; d — диаметр обрабатываемой поверхности, м.

В результате статистической обработки данных экспериментальных исследований накопленной энергии деформации W получены аппроксимирующие зависимости вида

$$W = W_0 \exp(-kh),$$

где h — толщина поверхностного слоя детали, в котором имеется накопленная энергия деформации, мкм; W_0 — предэкспоненциальный множитель, представляющий собой накопленную энергию поверхности материала, Дж/м³; k — коэффициент, характеризующий интенсивность изменения энергии накопленной деформации по глубине поверхностного слоя.

Значения величин W_0 и k при различных режимах шлифования и для разных материалов, а также достоверность аппроксимации по методу наименьших квадратов R^2 приведены в табл. 5.

Установлена взаимосвязь между степенью упрочнения материала, удельной накопленной энергией деформации $W_{уд}$, Дж/м³, на поверхности обрабатываемого материала [4]

$$N = \frac{\alpha \sqrt{W_{уд} G}}{\sigma_{0,2}}, \quad (6)$$

где G — модуль сдвига материала детали, Па; $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести материала детали; α — параметр междислокационного взаимодействия.

Значения коэффициентов в уравнениях аппроксимации

Обрабатываемый материал	Глубина шлифования t , мкм											
	10			20			35			50		
	$W_0 \cdot 10^8$	$k \cdot 10^6$	R^2	$W_0 \cdot 10^8$	$k \cdot 10^6$	R^2	$W_0 \cdot 10^8$	$k \cdot 10^6$	R^2	$W_0 \cdot 10^8$	$k \cdot 10^6$	R^2
ХН77ТЮР	—	—	—	0,027	-0,284	0,72	0,091	-0,523	0,71	0,365	-1,280	0,93
Р9К5	1,535	-1,449	0,99	1,392	-1,174	0,98	1,001	-0,852	0,99	2,005	-0,895	0,99
Х13М	0,128	-1,168	0,90	0,261	-1,221	0,71	0,494	-1,281	0,94	0,247	-0,763	0,92
У7	0,452	-0,207	0,86	1,207	-0,466	0,89	2,905	-0,498	0,93	3,549	-0,466	0,91
Ст3	0,206	-0,170	0,95	0,287	-0,252	0,89	0,380	-0,269	0,97	0,434	-0,233	0,80
Cu	0,131	-0,179	0,98	0,104	-0,111	0,94	0,143	-0,087	0,92	0,211	-0,130	0,95
12Х2Н4А	0,677	-2,256	0,96	—	—	—	0,525	-1,202	0,88	1,111	-0,825	0,95

Пример расчета по формуле (6) режимов шлифования жаропрочного сплава на никелевой основе ХН77ТЮР для обеспечения нескольких значений степени наклепа представлен в табл. 6, где сравниваются расчетные и экспериментальные значения степени наклепа. Погрешность расчета по разработанной методике не превышает 24 %, что для практических целей является допустимым.

Получены также расчетные зависимости для определения глубины и степени наклепа при дробеструйном упрочнении поверхностного слоя детали

$$h_H = \sqrt{\frac{2mq \sqrt{0,6 \frac{\rho_r l}{\rho_d D} (1 + k_1) \sin \alpha}}{\pi t_0 \sigma_T d^2}}, \quad (7)$$

$$\Delta H = \frac{2,42}{\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{B \text{ э}}}\right)^{0,8}} \sqrt{\frac{2\sigma_T mq \sqrt{0,6 \frac{\rho_r l}{\rho_d D} (1 + k_1) \sin \alpha}}{\pi t_0 \sigma_T d^2}}, \quad (8)$$

где m — масса дробинки, кг; q — объемный расход воздуха, м³/ч; ρ_r, ρ_d — плотности газа и материала детали соответственно, кг/м³; l — длина сопла, м; D — диаметр дробы, м; d — диаметр сопла, м; t_0 — время контакта дробинки с обрабатываемым материалом, ч; α — угол падения (атаки) дробинки на обрабатываемую поверхность; k_1 — показатель адиабаты, $k_1 = C_p/C_v$, C_p, C_v — удельные теплоемкости окружающей среды при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно. Для воздуха $k_1 = 1,4$.

Сопоставление результатов расчетов по формулам (7) и (8) с результатами экспериментов приведено в табл. 7.

Эксперименты выполняли при упрочнении образцов из сплава ЭИ787 (ХН35ВТЮ) и ВТ6 при следующих условиях обработки: давление воздуха $P = 0,2 \dots 0,5$ МПа; угол атаки дробы $\alpha = 30 \dots 90^\circ$; расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности $L = 125$ мм.

Таблица 6

Пример расчета режима шлифования для сплава ХН77ТЮР по заданным значениям степени наклепа (режим шлифования: $V_k = 28$ м/с, $V_d = 19$ м/мин)

Заданное значение степени наклепа N , %	t , мкм	Расчетные величины				Экспериментальное значение $N_{\text{экс}}$, %	Погрешность расчета, %
		P_z , Н	W , МДж/м ³	$\Lambda \cdot 10^{10}$, см ⁻²	N_p , %		
15	4	30,2	1,02	3,6	15,2	12,3	23,6
20	12	71,3	1,81	6,5	20,2	17,0	18,8
30	48	151,9	3,99	14,3	30,0	39,0	19,7

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени и глубины наклепа при угле атаки дроби 45°, расстоянии $L = 125$ мм

Материал образца	Давление воздуха P , МПа	Степень наклепа ΔHV , %			Глубина наклепа h_n , мм		
		Эксперимент	Расчет	Погрешность расчета	Эксперимент	Расчет	Погрешность расчета
ЭИ787	0,2	47,42	46,49	2	0,187	0,203	7,88
	0,3	50,65	57,02	11,17	0,191	0,249	23,29
	0,4	57,1	65,95	13,42	0,211	0,288	26,73
	0,5	55,81	73,7	24,31	0,243	0,322	24,53
ВТ6	0,2	29,36	31,82	7,73	0,143	0,178	19,66
	0,3	36,18	38,97	7,16	0,178	0,218	18,34
	0,4	34,82	45,05	22,7	0,183	0,252	27,38
	0,5	34,82	49,7	29,9	0,201	0,281	28,46

Заключение

Полученные расчетные зависимости для определения степени и глубины наклепа могут использоваться для назначения технологических условий обработки, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностного слоя, так как они обеспечивают достаточно близкое совпадение результатов расчета и экспериментов, допустимое на этапе технологической подготовки производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1968. 400 с.
2. **Безъязычный В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
3. **Силин С.С.** Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
4. **Безъязычный В.Ф., Прокофьев М.А., Виноградова О.В.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей машин при упрочнении в процессе шлифования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 1 (85). С. 3—6.

УДК 621.787

В.Ф. Безъязычный, Д.С. Голованов

(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)

E-mail: technology@rgata.ru

Методика определения остаточных напряжений в поверхностном слое детали при дорновании

Разработана методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое детали при дорновании с учетом теплового и силового воздействий.

Ключевые слова: остаточные напряжения, поверхностный слой, обработка дорнованием.

There was developed procedure of determination of surface layer residual stresses during burnishing, taking into account thermal and force effects.

Keywords: residual stresses, surface layer, burnishing.

В настоящее время широкое распространение получила высокопроизводительная чистовая калибрующая обработка заготовок методом дор-

нования. Этот метод пластического деформирования позволяет повысить точность обработки и создать требуемые свойства поверхностного слоя

(остаточные напряжения, наклеп, шероховатость) [1–4].

Процесс дорнования характеризуется сложной физической природой и сопровождается одновременным протеканием механических, тепловых, диффузионных и химических процессов. В данной статье рассматриваются только тепловые и механические процессы, определяющие интенсивность и взаимозависимость протекания диффузионных и химических процессов.

Тепловые процессы, сопровождающие высокопроизводительную обработку, оказывают определяющее влияние на закономерности протекания всего процесса обработки. Физико-механическое состояние поверхностного слоя обработанных деталей зависит от температурного поля, которое для любой точки детали является переменным во времени. Назначение рациональных режимов обработки с учетом требований к качеству обработанных поверхностей невозможно без исследования температурных полей и анализа возможности управления ходом тепловых процессов.

Наиболее распространенным методом теоретического определения тепловых полей при механической обработке является метод источников тепла, поэтому первоначально решался вопрос о том, что представляет собой тепловой источник в зоне контакта инструмента с деталью.

В процессе обработки в зоне контакта происходит сложное физико-механическое взаимодействие контактирующих тел. В точках контакта в результате трения выделяется теплота, которая в виде тепловых потоков распределяется между контактирующими телами, нагревая их, и влияет на ход процесса. Также теплота выделяется в зоне деформации обрабатываемого материала вследствие необратимых пластических взаимодействий.

В процессе протягивания дорна образуется деформированный слой, отличающийся большой износостойкостью и наличием остаточных напряжений [4].

Исследования показывают, что остаточные напряжения после обработки отверстий деформирующими протяжками могут быть как положительными (напряжения растяжения), так и отрицательными (напряжения сжатия), и иметь различную величину. При этом установлено, что эксплуатационные свойства обработанной поверхности существенно повышаются при наличии в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия и снижаются при наличии остаточных напряжений растяжения [2, 3]. Поэтому для практических целей необходимо знать, при каких условиях получаются те или иные остаточные напряжения.

Поскольку в данной работе остаточные напряжения определяются с учетом действия температурного и силового факторов, то вначале требуется определить температурное поле, развивающееся в поверхностном слое обрабатываемого изделия. Схема тепловыделения в зоне поверхностного пластического деформирования приведена на рис. 1 [4].

В настоящей работе поставлена задача определения температуры в поверхностном слое изделия от действия объемного кольцевого источника тепла $ABKNN_1A_1A_2D_1DA$.

Задача формулируется следующим образом: в бесконечном теле быстро, со скоростью V в направлении отрицательного X движется объемный кольцевой источник тепла $ABKNN_1A_1A_2D_1DA$ сложной конфигурации. Считаем известными законы распределения интенсивностей тепловыделения на участках KB , NA и AD , полагая их постоянными по глубине в направлении оси Y . В начальный момент времени температура тела равна нулю. Требуется определить температурное поле, развивающееся вокруг кольцевого источника тепла в движущейся вместе с источником системе координат с началом в точке O , расположенной на оси детали.

Результирующая температура в изделии θ_Σ определяется суммой температур от источников $ABKNA$, ANN_1A_1A , ADD_1A_2A :

$$\theta_\Sigma = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3, \quad (1)$$

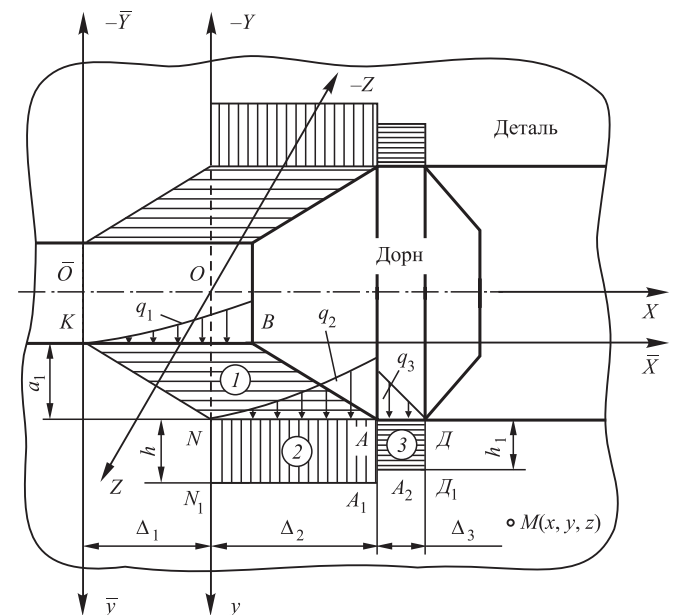


Рис. 1. Расчетная схема к определению температурного поля в изделии при дорновании от действия объемного источника тепла

где θ_1 — температура от источника $ABKNA$, возникает в зоне основных пластических деформаций подминаемого припуска и является следствием процессов сдвига подминаемого слоя; θ_2 — температура от источника ANN_1A_1A , возникает в зоне опережающих пластических деформаций; θ_3 — температура от источника AA_2D_1DA , возникает в зоне контакта цилиндрической ленточки инструмента с обрабатываемой поверхностью и является следствием процессов трения и пластических деформаций на цилиндрической поверхности инструмента.

Температурное поле от действия быстро движущегося кольцевого источника тепла на поверхности детали описывается уравнением

$$\theta = \frac{q}{4c\rho(\pi a)^{\frac{3}{2}}(\tau - \tau_1)^{\frac{3}{2}}} \exp\{-[x - x_0 - V(\tau - \tau_1)]^2 + R^2 + r^2 - 2r \cos(\varphi - \varphi_0) / [4a(\tau - \tau_1)]\}, \quad (2)$$

где θ — температура в заданной точке поверхностного слоя; q — интенсивность теплового источника; $c\rho$ — удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала; V — скорость дорнования; x_0, φ_0 — координата по оси X и угол теплового источника соответственно; x, φ — координата по оси X и угол расположения рассматриваемой точки; R — радиус отверстия детали; r — текущий радиус рассматриваемой точки, в которой определяется температура; a — температуропроводность материала детали; τ и τ_1 — время нагревания и охлаждения детали в процессе обработки.

Таким образом, температура от действия объемного кольцевого источника тепла определяется по формуле

$$\theta_1 = \frac{Rq_{AB}}{4c\rho(\pi a)^{\frac{3}{2}}e^3} \times \int_0^{\tau_0} \exp\left\{-\frac{R^2 + r^2}{4a(\tau - \tau_1)} - b(\tau - \tau_1)\right\} \frac{d\tau_1}{(\tau - \tau_1)^{\frac{3}{2}}} \times \int_{\Delta_1}^{\Delta_1 + \Delta_2} \exp\left\{\frac{3x_0}{\Delta_2} - \frac{[x - x_0 - V(\tau - \tau_1)]^2}{4a(\tau - \tau_1)}\right\} dx_0 \times \int_0^{2\pi} \exp\left\{\frac{Rr \cos \varphi}{2a(\tau - \tau_1)} - \frac{r \sin \varphi \operatorname{ctg} \beta_1}{\Delta_2}\right\} d\varphi, \quad (3)$$

где q_{AB} — интенсивность тепловыделения в плоскости сдвига AB ; β_1 — угол наклона плоскости сдвига; Δ_2 — протяженность наклонного источника вдоль оси X ; e — основание натурального логарифма.

Температура в поверхностном слое изделия от действия быстро движущегося объемного кольцевого источника тепла ANN_1A_1A определяется с использованием формулы

$$\theta_2 = \frac{Rq'_{AB}}{4c\rho(\pi a)^{\frac{3}{2}}e^3} \times \int_0^{\tau_0} \exp\left\{-\frac{R^2 + r^2}{4a(\tau - \tau_1)} - b(\tau - \tau_1)\right\} \frac{d\tau_1}{(\tau - \tau_1)^{\frac{3}{2}}} \times \int_0^{\Delta_2} \exp\left\{\frac{3x_0}{\Delta_2} - \frac{[x - x_0 - V(\tau - \tau_1)]^2}{4a(\tau - \tau_1)}\right\} dx_0 \times \int_0^{2\pi} \exp\left\{\frac{Rr \cos \varphi}{2a(\tau - \tau_1)}\right\} d\varphi, \quad (4)$$

где q'_{AB} — интенсивность тепловыделения второго объемного источника тепла.

Температура от действия источника AA_2D_1DA определяется по формуле

$$\theta_3 = \frac{Rq''_{AB}}{4c\rho(\pi a)^{\frac{3}{2}}e^3} \times \int_0^{\tau_0} \exp\left\{-\frac{R^2 + r^2}{4a(\tau - \tau_1)} - b(\tau - \tau_1)\right\} \frac{d\tau_1}{(\tau - \tau_1)^{\frac{3}{2}}} \times \int_{\Delta_2}^{\Delta_2 + \Delta_3} \left(1 + \frac{\Delta_2 - x_0}{\Delta_3}\right) \times \exp\left\{-\frac{[x - x_0 - V(\tau - \tau_1)]^2}{4a(\tau - \tau_1)}\right\} dx_0 \times \int_0^{2\pi} \exp\left\{\frac{Rr \cos \varphi}{2a(\tau - \tau_1)}\right\} d\varphi, \quad (5)$$

где q''_{AB} — интенсивность тепловыделения третьего объемного источника тепла; Δ_3 — протяженность третьего объемного источника тепла вдоль оси X .

Для преобразования интегралов (3)...(5) расчет температурных полей проводился на компьютере в программе Mathcad Professional для конкретных значений безразмерных комплексов. На основании проведенных расчетов было изучено влияние на температуру в поверхностном слое детали при различной глубине подминаемого припуска радиуса обрабатываемого отверстия, скорости дор-

нования, свойств обрабатываемого материала и получена следующая зависимость:

$$\theta_{\Sigma} = C \left(\frac{\tau_p}{c\rho B} \right)^X B^{X_1} \left(\frac{a_1}{R} \right)^{X_2} \left(\frac{r}{R} \right)^{X_3}, \quad (6)$$

где τ_p — сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу; $B = \operatorname{tg}\beta_1$ — критерий, характеризующий условия пластического деформирования подминаемого припуска; $B = VR/a$ — критерий, характеризующий степень влияния режимных условий процесса по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала; a_1/R — относительный натяг при дорновании; r — текущий радиус расположения рассматриваемого слоя; R — радиус отверстия детали; a_1 — толщина подминаемого слоя; C, X, X_1, X_2, X_3 — величины, зависящие от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии инструмента, режимов обработки.

Для расчета температурных остаточных напряжений может быть применен метод В.В. Абрамова [3]. Если рассматривать полый цилиндр с внутренним радиусом r_b и внешним радиусом r_n , то в предположении идеальной упругости обрабатываемого материала при любом законе распределения тепловых расширений δ по сечению цилиндра осевые и тангенциальные напряжения будут определяться по следующим уравнениям:

$$\sigma_0 = \left(-\delta_i + \frac{r_b}{r_n} \frac{\int_{r_b}^{r_n} \delta_i E_i r dr}{\int_{r_b}^{r_n} E_i r dr} \right) \frac{E}{1-\mu};$$

$$\sigma_{\tau} = \left(-\delta_i + \frac{r_b}{r_n} \frac{\int_{r_b}^{r_n} \delta_i E_i dr}{\int_{r_b}^{r_n} E_i dr} \right) \frac{E}{1-\mu}, \quad (7)$$

где $\delta_i = \alpha_i \theta_i$ — структурное тепловое расширение в i -м слое; α_i — коэффициент линейного температурного расширения материала детали в i -м слое; E — модуль упругости обрабатываемого материала, МПа; μ — коэффициент Пуассона обрабатываемого материала.

Подставляя в выражения (7) уравнение для определения максимального значения температуры и интегрируя полученные выражения, определим осевые и тангенциальные температурные напряжения, соответствующие процессу нагревания.

При определении тепловых напряжений в деталях типа "вал с отверстием" формула для определения тангенциальных температурных напряжений в области упругих деформаций примет вид

$$\sigma_{\tau n}^y = \left\{ -\beta_d C \left(\frac{\tau_p}{c\rho B} \right)^X B^{X_1} \left(\frac{a_1}{R} \right)^{X_2} \left(\frac{r}{R} \right)^{X_3} + \beta_d C \left(\frac{\tau_p}{c\rho B} \right)^X B^{X_1} \left(\frac{a_1}{R} \right)^{X_2} \frac{r_n^{1+X_3} - R^{1+X_3}}{(1+X_3)R^{X_3} r_n - R} \right\} \frac{E}{1-\mu}, \quad (8)$$

где r_n — наружный радиус обрабатываемой детали; β_d — коэффициент линейного температурного расширения обрабатываемого материала; μ, E — коэффициент Пуассона и модуль упругости обрабатываемого материала соответственно.

При упругопластических деформациях формула для определения тангенциальных температурных напряжений в области пластических деформаций примет вид

$$\sigma_{\tau n}^n = \left\{ -\beta_d C \left(\frac{\tau_p}{c\rho B} \right)^X B^{X_1} \left(\frac{a_1}{R} \right)^{X_2} \left(\frac{r}{R} \right)^{X_3} + \beta_d C \left(\frac{\tau_p}{c\rho B} \right)^X B^{X_1} \left(\frac{a_1}{R} \right)^{X_2} \frac{r_n^{1+X_3} - R^{1+X_3}}{(1+X_3)R^{X_3}} \times \left[\frac{r_{0n}^{1+X_3} - R^{1+X_3}}{r_{0n} - R} - \frac{(1-\mu)\sigma_{\tau}(r_n - r_{0n})}{E(r_{0n} - R)} \right] \right\} \frac{E}{1-\mu}, \quad (9)$$

где r_{0n} — радиус, являющийся границей раздела упругих и пластических деформаций в поверхностном слое при нагревании; σ_{τ} — предел текучести обрабатываемого материала.

Остаточные напряжения определяются как результирующие напряжения при нагревании и охлаждении, т. е.

$$\sigma'_{\tau} = \sigma_n + \sigma_0. \quad (10)$$

На основе теоремы Генки о разгрузке, положений теории упругости и пластичности получены уравнения для остаточных напряжений от действия силового фактора.

Напряжения, создаваемые действием сил на обработанную поверхность со стороны заборной

поверхности инструмента, определяются уравнениями

$$\begin{aligned} \sigma'_x &= -\frac{\tau_p}{2\pi} \psi_1 \left[B; \sin(\rho_1 - \alpha + 90^\circ); \frac{r-R}{h}; \frac{h}{a_1} \right] \frac{1}{1-\mu^2}; \\ \sigma'_y &= -\frac{\tau_p}{2\pi} \psi_2 \left[B; \sin(\rho_1 - \alpha + 90^\circ); \frac{r-R}{h}; \frac{h}{a_1} \right] \frac{1}{1-\mu^2}; \\ \tau'_{xy} &= \frac{\tau_p}{2\pi} \psi_3 \left[B; \sin(\rho_1 - \alpha + 90^\circ); \frac{r-R}{h}; \frac{h}{a_1} \right] \frac{1}{1-\mu^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где ρ_1 — угол внешнего трения; α — угол заборного конуса; h — глубина залегания опережающих пластических деформаций.

Напряжения, создаваемые действием сил, приложенных к кольцевой поверхности инструмента, определяются по формулам

$$\begin{aligned} \sigma''_x &= -\frac{R_1}{2\pi \cdot 2\pi R \Delta_3} \xi_1 \left[\rho_2; B; \frac{\Delta_3}{\Delta_1}; \frac{r-R}{h_1}; \frac{h_1}{h}; \frac{h}{a_1} \right] \frac{1}{1-\mu^2}; \\ \sigma''_y &= -\frac{R_1}{2\pi \cdot 2\pi R \Delta_3} \xi_2 \left[\rho_2; B; \frac{\Delta_3}{\Delta_1}; \frac{r-R}{h_1}; \frac{h_1}{h}; \frac{h}{a_1} \right] \frac{1}{1-\mu^2}; \\ \tau''_{xy} &= \frac{R_1}{2\pi \cdot 2\pi R \Delta_3} \xi_3 \left[\rho_2; B; \frac{\Delta_3}{\Delta_1}; \frac{r-R}{h_1}; \frac{h_1}{h}; \frac{h}{a_1} \right] \frac{1}{1-\mu^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где R_1 — сила, действующая по цилиндрической поверхности дорна; ρ_2 — угол трения по задней поверхности инструмента; h_1 — глубина пластической деформации в поверхностном слое.

Остаточные напряжения от действия силового фактора могут быть определены по формулам

$$\begin{aligned} \sigma'_{\Sigma x} &= \sigma'_x + \sigma''_x; \\ \sigma'_{\Sigma y} &= \sigma'_y + \sigma''_y; \\ \tau'_{\Sigma xy} &= \tau'_y + \tau''_{xy}. \end{aligned} \quad (13)$$

Суммарные остаточные напряжения определяются алгебраической суммой тепловых и силовых остаточных напряжений:

$$\sigma'_\Sigma = \sigma'_T + \sigma'_{\Sigma\Sigma}. \quad (14)$$

Результаты расчетов, выполненных по данной методике, и практические данные приведены на рис. 2. Используя данную методику, можно сба-

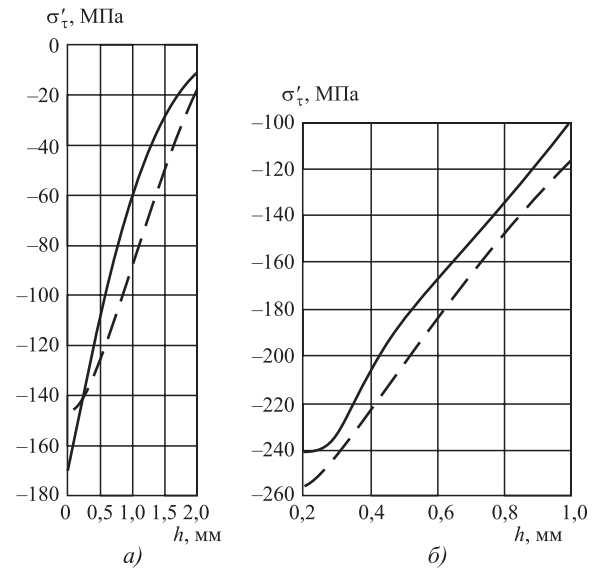


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения остаточных тангенциальных напряжений при обработке методом дорнования (материал дорна ВК8; $\alpha = 4^\circ$; $b = 1,5$ мм): а — стали 45 ($D_H = 40$ мм; $d_B = 30$ мм; $t = 0,15$ мм); б — стали У8 ($D_H = 49$ мм; $d_B = 35$ мм; $t = 0,2$ мм); — расчет; - - - эксперимент

лансировать тепловое и силовое воздействия на обрабатываемую деталь, для того чтобы получить остаточные напряжения заданной величины.

Таким образом, использование предложенной методики позволяет назначать режимы обработки, обеспечивающие получение заданной глубины залегания и величины остаточных напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Силин С.С.** Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
2. **Проскуряков Ю.Г.** Дорнование отверстий. М.: Машгиз, 1961. 191 с.
3. **Абрамов В.В.** Напряжения и деформации при термической обработке стали. Киев: Вища шк., 1985. 135 с.
4. **Шарова Т.В., Голованов Д.С.** Разработка математической модели формирования остаточных напряжений с учетом температурного и силового факторов при дорновании // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 8. С. 22—25.

¹Д.И. Волков, ²А.Ю. Гущин, ¹А.Н. Рыкунов
(¹ Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва,
²ОКБ им. Архипа Люльки — филиал УМПО, г. Лыткарино)
E-mail: d_i_volkov@rsatu.ru

Технологические возможности обработки металлическими и стеклянными микрошариками материалов ВТ9 и ЭИ787ВД

Изложены вопросы упрочнения образцов из материалов ВТ9 и ЭИ787ВД (ХН35ВТЮ-ВД) с помощью металлических и стеклянных микрошариков. Приведены распределения остаточных напряжений, глубина и степень наклепа в зависимости от условий упрочнения и результаты усталостных испытаний.

Ключевые слова: дробеструйная обработка, остаточные напряжения, глубина наклепа, степень наклепа, выносливость образцов.

The questions of hardening of samples from materials VT9 and EI787VD with the help of metal and glass microspheres are stated. The distributions of residual stresses, the depth and degree of cold work, depending on the conditions of hardening, the results of fatigue tests are given.

Keywords: shot blasting, residual stresses, depth of cold work, degree of cold work, endurance of samples.

Введение

В современном машиностроении с каждым годом все острее встает проблема повышения прочностных свойств деталей машин. В этих целях широко используются методы поверхностного упрочнения, в частности большинство тяжело нагруженных деталей машин упрочняется дробеструйной обработкой с помощью микрошариков или дроби [1–6]. В последнее время большое распространение получила упрочняющая обработка с помощью стеклянных микрошариков, выбором условий разгона которых можно обеспечить необходимые условия упрочнения [7, 8].

Одной из основных задач дробеструйной обработки является повышение усталостной прочности и износостойкости деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, в том числе и ударных. Сущность дробеструйных способов упрочнения состоит в том, что поток дроби направляется на поверхность обрабатываемой детали со скоростью соударения около 100 м/с, в результате чего происходит пластическое деформирование ее поверхности.

Главными преимуществами указанного способа являются его высокая технологичность и универсальность, обеспечивающие возможность обработки любых сложнофасонных поверхностей деталей без точного базирования и применения дорогостоящего оборудования. Этим способом иногда пользуются для предупреждения свой-

ственного деталям из цветных сплавов растрескивания при их эксплуатации в условиях коррозионных сред. Он применим к деталям самой сложной конфигурации, изготовляемым как из черных, так и из цветных металлов, и отличается высокой производительностью и экономичностью.

При обработке деталей из сталей используется чугунная или стальная дробь. Во избежание электролитической коррозии, связанной с вкраплением частиц в обрабатываемую поверхность, для деталей из цветных сплавов применяется алюминиевая или стеклянная дробь. Диаметр дроби (от 0,4 до 2 мм) влияет на чистоту поверхности, причем обработка мелкими стальными шариками дает более чистую поверхность. При обработке дробью в каждом конкретном случае необходимо установить режим обработки: размер дроби, ее скорость, количество дроби, приходящееся на единицу обрабатываемой поверхности, направление потока дроби относительно детали, время обработки и пр. Оптимальная продолжительность процесса, как и другие его параметры, устанавливается экспериментально.

После дробеструйной обработки опорная поверхность представляет собой сочетание лунок, образовавшихся в результате взаимодействия дробинок с поверхностью детали. Это вызывает упрочнение поверхностного слоя металла на глубину 0,2...0,6 мм.

Кроме этого, в процессе дробеобработки в поверхностном слое образуются благоприятные рас-

предела остаточных напряжений сжатия по сечению поверхности. Эффективность обработки во многом зависит от угла падения дроби на обрабатываемую поверхность. Оптимальным углом падения, при котором достигается наибольшая эффективность обработки, считается угол 90°.

Как показали исследования, увеличение размера дроби приводит к повышению шероховатости поверхности, росту остаточных напряжений сжатия, глубины наклепа и механических свойств поверхностного слоя. Шероховатость поверхности увеличивается с ростом скорости и диаметра дроби. При дробеструйной обработке может быть получен параметр шероховатости $Rz = 20...6,3$ мкм [9]. Исходная шероховатость поверхности практически не влияет на эффективность дробеструйной обработки.

При дробеструйной обработке могут применяться различные способы разгона рабочей среды (дроби). Различают дробеструйные установки с пневморазгоном, гидродробеструйные и с гравитационным разгоном. Пневморазгон осуществляется потоком сжатого воздуха с помощью форсунок, кинетическая энергия летящих частиц регулируется изменением давления в форсунке дробеметной установки.

Расчетное определение результатов упрочнения деталей может вносить некоторые неточности в определение величины пластически деформированного слоя при динамически изменяющихся нагрузках. Кроме того, в используемых моделях не учитывается сформированное на предыдущей операции напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя, т. е. не учитывается технологическое наследование, что также может служить причиной неточности в определении глубины пластически деформированного слоя и величины остаточных напряжений. Это также может привести в упругопластических расчетах к неверному определению запаса пластичности в материале и при неправильном прогнозировании глубины и степени наклепа — к явлению перенаклепа, охрупчиванию материала и, как следствие, к появлению трещин в поверхностном слое. Поэтому экспериментальные методы исследования повышения выносливости при дробеструйном упрочнении являются актуальными.

Для выявления влияния материала микрошариков и режима их разгона на параметры поверхностного слоя упрочняемых деталей были проведены исследования по упрочнению образцов из материалов ВТ9 и ЭИ787ВД металлическими и стеклянными микрошариками.

Подготовка образцов и условия проведения исследований

Исследуемые материалы ВТ9 и ЭИ787ВД применяются для изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей. Для повышения выносливости профиль пера и поверхность галтельного перехода к хвостовику могут подвергаться упрочнению. В этих целях в технологических процессах используются различные методы. Одним из возможных вариантов является метод упрочнения микрошариками. Механические свойства материалов ВТ9 и ЭИ787ВД представлены в табл. 1.

Подготовку образцов и последующую термообработку проводили на режимах, соответствующих режимам серийной технологии. Механическую обработку образцов осуществляли фрезерованием с последующими шлифованием и полированием. Образцы обоих материалов имели одинаковые размеры, которые приведены на рис. 1.

Образцы упрочняли микрошариками из сплава ЖС6У и стеклянными микрошариками в целях отыскания оптимального режима упрочнения. Упрочнение проводили на дробеструйной установке с воздушным разгоном среды. Образ-

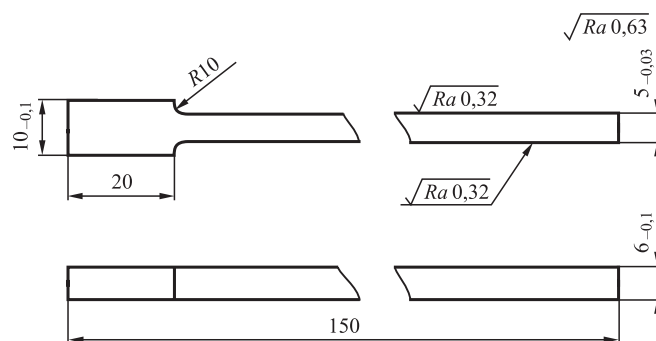


Рис. 1. Образец для исследований

Таблица 1

Механические свойства материалов ВТ9 и ЭИ787ВД при температуре 20 °С

Материал	Модуль упругости, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
ВТ9	120 000	950...1150	1050...1250	10	30
ЭИ787ВД	218 500	700...880	1050...1270	15	25

цы упрочняли при различных давлении и диаметрах микрошариков. Были изготовлены по четыре партии образцов для каждого материала, в зависимости от варианта заключительной операции:

- партия 1 — полирование;
- партия 2 — дробеструйное упрочнение металлическими (ЖСБУ) микрошариками ($P = 0,2$ МПа; $t = 6$ мин; диаметр микрошариков 0,2...0,315 мм);
- партия 3 — дробеструйное упрочнение стеклянными микрошариками ($P = 0,3$ МПа; $t = 9$ мин; диаметр микрошариков 0,05...0,15 мм);
- партия 4 — дробеструйное упрочнение стеклянными микрошариками ($P = 0,35$ МПа; $t = 9$ мин; диаметр микрошариков 0,05...0,15 мм).

Результаты исследований

Исследование параметров поверхностного слоя упрочненных образцов из обоих материалов проводили с помощью приборов ПМТ-3 (глубина и степень наклепа) и ПИОН-2 (остаточные напряжения). Результаты измерения параметров поверхностного слоя представлены в табл. 2, 3 и на рис. 2, 3.

Исследования показали, что упрочнение металлическими микрошариками позволяет создать в поверхностном слое наклеп глубиной 0,05 мм со степенью 14 % для ВТ9 и 0,07 мм со степенью 13 % для ЭИ787ВД, а упрочнение стеклянными микрошариками создает наклеп глубиной

Таблица 2

Результаты исследования параметров поверхностного слоя образцов из сплава ВТ9

Номер партии	Максимум остаточных напряжений, МПа	Глубина деформированного слоя, мм	Степень наклепа, %
1	235	0,04	5
2	600	0,05	14
3	610	0,07	11
4	700	0,09	13

Таблица 3

Результаты исследования параметров поверхностного слоя образцов из сплава ЭИ787ВД

Номер партии	Максимум остаточных напряжений, МПа	Глубина деформированного слоя, мм	Степень наклепа, %
1	150	Нет	Нет
2	650	0,07	13
3	580	0,07	11
4	660	0,08	13

0,07...0,09 мм со степенью 11...13 % для обоих исследуемых материалов. Применение стеклянных микрошариков при повышенном давлении позволяет увеличить глубину деформированного слоя по сравнению с применением металлических, что можно объяснить более высокой скоростью разгона стеклянных микрошариков.

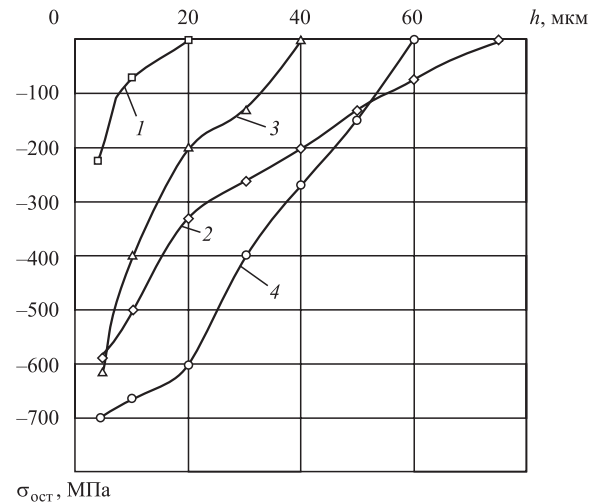


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ в образцах из сплава ВТ9:

1 — после полирования; 2 — после упрочнения металлическими микрошариками; 3 — после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,3$ МПа; 4 — после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,35$ МПа; h — глубина залегания остаточных напряжений от поверхности образца

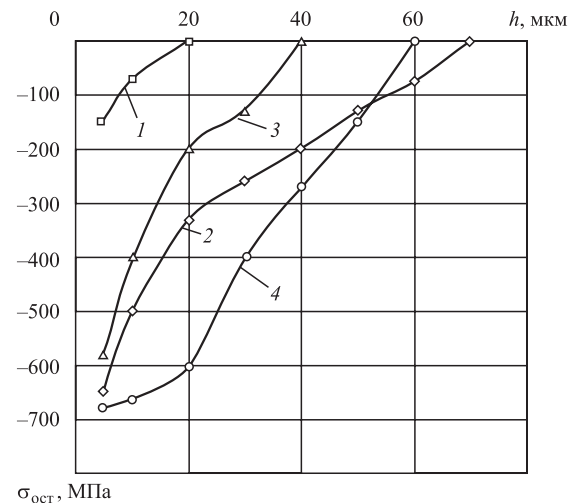


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ в образцах из ЭИ787ВД:

1 — после полирования; 2 — после упрочнения металлическими микрошариками; 3 — после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,3$ МПа; 4 — после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,35$ МПа; h — глубина залегания остаточных напряжений от поверхности образца

В поверхностном слое подвергнутых дробеструйной обработке образцов формируются сжимающие остаточные напряжения, максимальные значения которых увеличиваются по сравнению с полированными образцами в 3...4 раза, достигая 600...700 МПа. При этом глубина распространения сжимающих напряжений составляет 0,07...0,75 мм при упрочнении металлическими микрошари-

ками, а при упрочнении стеклянными микрошариками — 0,04 мм при давлении $P = 0,3$ МПа и 0,06 мм при $P = 0,35$ МПа. Распределения остаточных напряжений для исследуемых материалов ВТ9 и ЭИ787ВД близки по характеру и значениям.

Для определения эффективности приведенных технологических вариантов упрочнения по критерию выносливости провели усталостные испытания образцов из ВТ9 и ЭИ787ВД. Испытания проводили на установках типа ВДЭС-400 при температуре 20 °С на базе $2 \cdot 10^7$ циклов согласно ускоренной методике. Напряжение, которое выдерживали заданную базу испытаний без разрушения не менее трех образцов, определяли как предел выносливости. Результаты испытаний представлены на рис. 4, 5.

Результаты исследования выносливости образцов показали, что упрочнение поверхности как металлическими, так и стеклянными микрошариками по сравнению с полированной поверхностью значительно повышает предел выносливости. При этом упрочнение металлическими шариками позволяет повысить выносливость по сравнению с полированными образцами на 23 % для ВТ9 и 32 % для ЭИ787ВД. Упрочнение стеклянными микрошариками при давлении $P = 0,3$ МПа позволяет повысить выносливость по сравнению с полированными образцами на 18 % для ВТ9 и 25 % для ЭИ787ВД, а при давлении 0,35 МПа — на 33 и 50 % соответственно.

Заклучение

Исследование параметров поверхностного слоя образцов позволяет сделать следующие выводы:

применение стеклянных микрошариков не дает существенного роста максимума остаточных напряжений по сравнению с металлическими даже при значительном увеличении давления;

применение металлических микрошариков позволяет увеличить глубину залегания остаточных напряжений по сравнению со стеклянными. При обработке металлическими шариками она составляет 0,075 мм для ВТ9 и 0,07 мм для ЭИ787ВД, стеклянными микрошариками — 0,04...0,05 мм для обоих материалов;

применение стеклянных микрошариков при повышенном давлении позволяет увеличить глубину деформированного слоя по сравнению с металлическими.

Результаты усталостных испытаний показали следующее:

применение упрочнения металлическими микрошариками способствовало повышению σ_{-1} полированных образцов на 23 % (ВТ9) и 32 % (ЭИ787ВД);

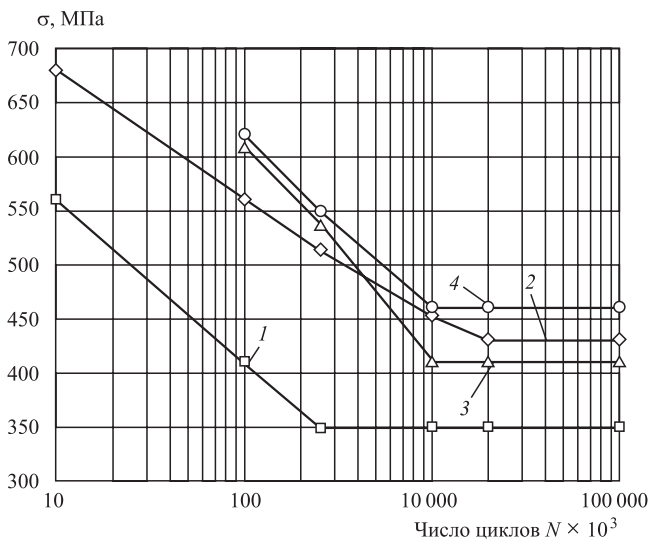


Рис. 4. Кривые выносливости образцов из сплава ВТ9: 1 — после полирования; 2 — после упрочнения металлическими микрошариками; 3 — после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,3$ МПа; 4 — после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,35$ МПа

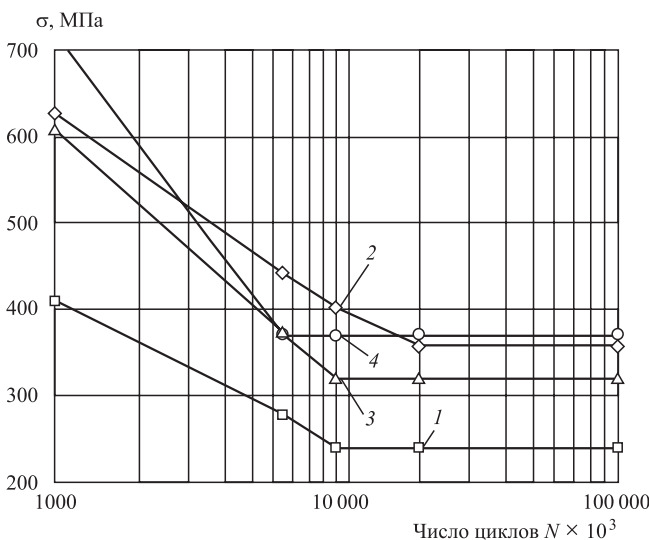


Рис. 5. Кривые выносливости образцов из ЭИ787ВД: 1 — после полирования; 2 — после упрочнения металлическими микрошариками; 3 — после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,3$ МПа; 4 — после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,35$ МПа

использование стеклянных микрошариков на режиме $P = 0,3$ МПа позволило повысить σ_{-1} полированных образцов на 18 % (ВТ9) и 25 % (ЭИ787ВД);

повышение давления при обработке стеклянными микрошариками до 0,35 МПа увеличивает σ_{-1} полированных образцов на 33 % (ВТ9) и 50 % (ЭИ787ВД).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Оптимизация** технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный, Т.Д. Кожина, А.В. Константинов и др. М.: Изд-во МАИ, 1993. 184 с.
2. **Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.
3. **Овсенко А.Н., Серебряков В.И., Гаек М.М.** Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. М.: Янус-К, 2004. 294 с.

4. **Технологическое** применение ударно-волновых процессов при виброударной обработке / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Ф.А. Пастухов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 10. С. 23—28.

5. **Отделочно-упрочняющая** обработка поверхностным пластическим деформированием / А.Г. Суслов, Р.В. Гуров, Е.С. Тишевских // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 9. С. 20—23.

6. **Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И.** Технологические методы повышения надежности деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 304 с.

7. **Чернявский Д.И.** Контактная прочность элементов машин при динамическом ударном взаимодействии // Вестник машиностроения. 2002. № 5. С. 3—8.

8. **Волков Д.И., Гуцин А.Ю.** Определение параметров поверхностного слоя при упрочнении микрошариками // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 11. С. 12—14.

9. **Исупов М.Г.** Шероховатость поверхности, получаемая струйно-ударной обработкой // Вестник машиностроения. 1999. № 11. С. 50—52.

УДК 621.8:621.9

А.Н. Болотеин, А.Н. Сутягин

(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)

E-mail: bolotein@rsatu.ru

Моделирование трибоконтакта сопрягаемых деталей машин с учетом упрочнения поверхностного слоя

Изложен подход к описанию геометрических параметров качества поверхностного слоя деталей машин, изготовленных с применением лезвийной обработки, на основе использования стандарта ISO 25000 с учетом физико-механических свойств материала. Представлена работа программного обеспечения, реализующего на базе разработанной математической модели визуализацию топографии механически обработанной поверхности, а также ее преобразование в результате процесса приработки.

Ключевые слова: упрочнение, микротвердость, износостойкость, равновесное состояние.

The approach to the description of the geometric parameters of the quality of the surface layer of machine parts machined based on the use standard ISO 25000 taking into consideration physical-mechanical properties of the materials is offered. The operation of the software implemented on the basis of the developed mathematical model of the visualization of topography of the machined surface, as well as its change as a result of the break-in period is shown.

Keywords: hardening, microhardness; wear-resistance; equilibrium state.

На этапе чистовой обработки ответственных деталей назначают так называемые оптимальные режимы резания, чтобы обеспечить требуемые параметры качества поверхностного слоя детали [1]. Оптимальные режимы резания, обеспечивающие

минимум износа режущего инструмента, целесообразно применять и с точки зрения обеспечения эксплуатационных свойств изделий. Обработка при оптимальном сочетании скорости резания и подачи обеспечивает максимальные значения

усталостной прочности, прочности на разрыв обработанных поверхностей деталей, которым соответствуют оптимальные параметры качества поверхностного слоя. Кроме того, работа на оптимальных скоростях резания обеспечивает регулярный профиль микронеровностей поверхности, что, в свою очередь, способствует обеспечению минимальной интенсивности изнашивания сопрягаемых деталей машин [1]. Таким образом, посредством назначения определенных технологических условий механической обработки могут быть обеспечены наилучшие значения сразу нескольких эксплуатационных свойств деталей машин.

Технология обработки поверхностей деталей машин оказывает значительное влияние на износостойкость поверхностного слоя. Для повышения долговечности сопрягаемых деталей машин необходимо, насколько это возможно, уменьшить их приработку в процессе эксплуатации. Переход от исходных технологических параметров качества поверхностного слоя к эксплуатационным является одним из основных условий завершения периода приработки. По его окончании на поверхности трения формируется шероховатость и устанавливается степень наклепа поверхностного слоя, не зависящие от исходных, полученных при механической обработке, а зависящие только от условий трения. Образовавшиеся шероховатость и степень наклепа поверхностного слоя являются равновесными для данной пары трения и обеспечивают минимальное изнашивание [2].

Контакт поверхностей деталей машин носит дискретный характер. Отношение номинальной площади контакта к фактической зависит от нагрузки и часто составляет доли процента. В процессе сжатия различные выступы поверхности находятся под разным напряжением. Выступы, первоначально расположенные дальше от противоположной поверхности, имеют меньшие напряжения, а расположенные ближе к поверхности прижимаемого контртела — большие. Удельные давления получаются соизмеримыми с твердостью материала и могут превышать до 3...5 раз твердость наклепанного материала.

В России наряду с существующими стандартами ГОСТ 25142—82 и ГОСТ 2789—73 в 2016 г. вступили в действие ГОСТ Р ИСО 4287—2014 и ГОСТ Р ИСО 25178-2—2014, которые регламентируют трехмерные параметры шероховатости поверхности. Кроме того, шероховатая поверхность может быть представлена в виде пространства Фурье.

В процессе обработки поверхности при лезвийной обработке происходит формирование поперечной и продольной шероховатости. В связи с

тем что образование поперечной шероховатости зависит от радиуса при вершине r режущего инструмента, углов в плане φ и φ_1 , подачи S , глубины резания t , составляющих силы резания P_x и P_y , температуры в зоне резания Θ_p , а также на основе анализа профилограмм цилиндрических поверхностей деталей, полученных в результате токарной обработки, принимаем, что функция базового профиля поперечной шероховатости для токарной обработки может быть описана с использованием ряда Фурье следующей функцией на длине рассматриваемого участка по координате x :

$$f_1(x) = \frac{4}{\pi} F(t, P_x, P_y, r, \varphi, \varphi_1, \theta_p) \sin\left(\frac{\pi x}{S}\right). \quad (1)$$

Продольная шероховатость, измеренная в направлении скорости резания, обусловлена колебаниями системы станок—приспособление—инструмент—деталь и, как следствие, жесткостью технологической системы j , а также скоростью резания v , передним γ и задним α углами режущего инструмента, составляющими силы резания P_z и P_y , температурой в зоне резания θ_p . Кроме того, на продольную шероховатость могут влиять погрешности, связанные с износом оборудования, например биением шпинделя станка. Продольная шероховатость может быть представлена алгоритмом псевдослучайных чисел, содержащим в своей основе преобразование Бокса—Мюллера, либо описана функцией перехода к общему нормальному распределению после получения стандартной нормальной случайной величины профиля, что позволяет завершить генерацию нормальной случайной величины, на длине рассматриваемого участка по координате y :

$$f_2(y) = \frac{4}{\pi} F(j, P_z, P_y, \gamma, \alpha, \theta_p, v) \sin\left(\frac{y}{2R}\right) + \sigma z, \quad (2)$$

где z — поправка для параметра шероховатости поверхности, обусловленная действием случайных факторов; σ — интенсивность воздействия случайных факторов на продольную шероховатость; R — радиус обрабатываемой заготовки.

На основе уравнений (1) и (2) может быть составлен алгоритм, позволяющий визуализировать картину изменения шероховатости контактируемых поверхностей во времени в процессе эксплуатации. Такой алгоритм может быть реализован в программном обеспечении статического или динамического представления картины контактирования. На рис. 1 представлены результаты

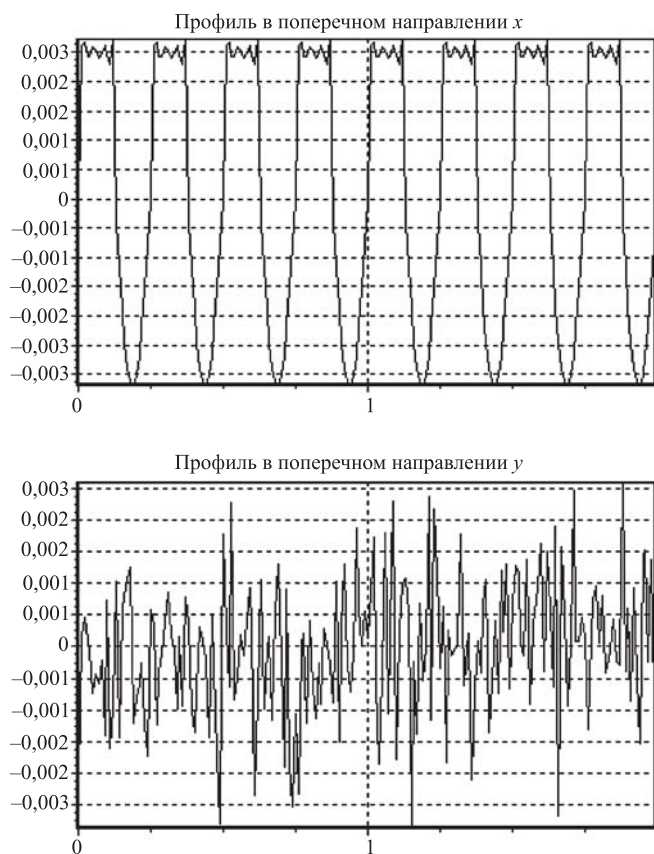


Рис. 1. Фрагмент работы программного обеспечения для расчета координат точек поверхности детали после приработки

расчета координат точек поверхности детали, полученной точением, после приработки с использованием разработанного программного обеспечения, а на рис. 2 — спектрограмма шероховатости приработанной поверхности.

В данном случае интересен вид неровностей поверхности после формирования площадок фактического контакта и образования равновесной шероховатости. Для визуализации полученного набора точек приработанной поверхности детали использовали функцию импорта координат точек из файла в САПР КОМПАС-3D (рис. 3). Файл координат точек трехмерного профиля поверхности формируется в разработанном авторами специализированном программном обеспечении (Свид. о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2017614676). На рис. 3 видно, что профиль поверхности приобрел ярко выраженные площадки контакта, подобные тем, что изображены на рис. 3, б.

Экспериментальные исследования проводили в лаборатории кафедры ТАДиОМ РГТУ им. П.А. Соловьёва с использованием машины трения Т-11. Были изготовлены образцы типа "диск" из материала 20Х13 (ГОСТ 5632—72) с твердостью 280 НV. В качестве контрообразцов использовали образцы типа "палец" из сплава ВК10 (ГОСТ 3882—74) с твердостью 840 НV. При проведении испытаний условно считали его неизна-

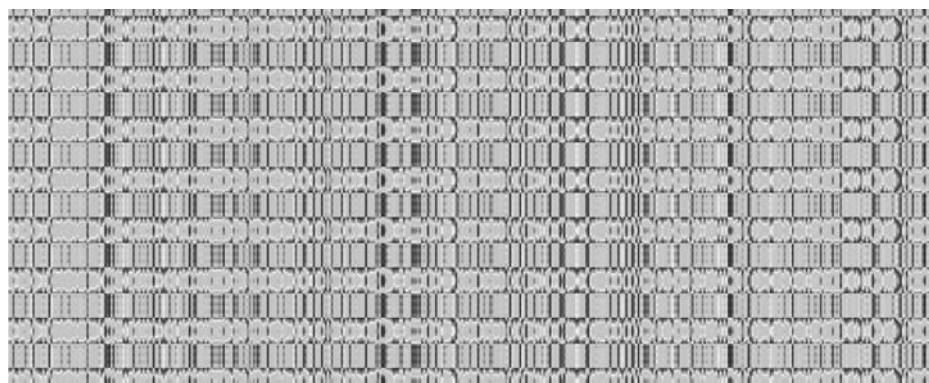
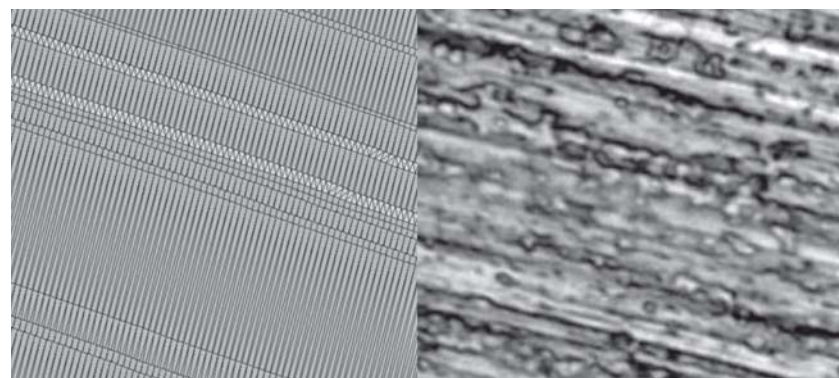


Рис. 2. Формирование спектрограммы шероховатости приработанной поверхности с помощью разработанного программного обеспечения



а)

б)

Рис. 3. Визуализация полученного набора точек приработанной поверхности детали в САПР КОМПАС-3D (а) и фотография реальной поверхности детали после приработки, $\times 40$, (б)

шиваемым. Испытания проводили при скорости скольжения 1м/с и нормальной нагрузке 4,9 Н. Геометрическая конфигурация и размеры образцов представлены на рис. 4.

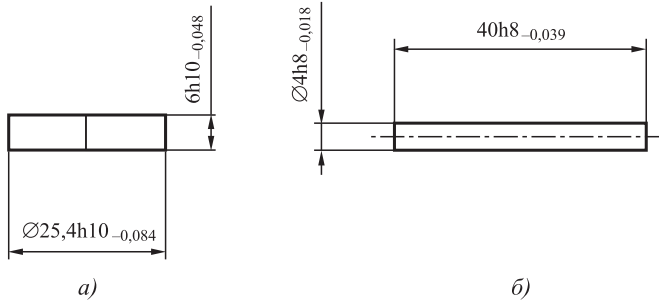


Рис. 4. Образцы типа "диск" (а) и "палец" (б)

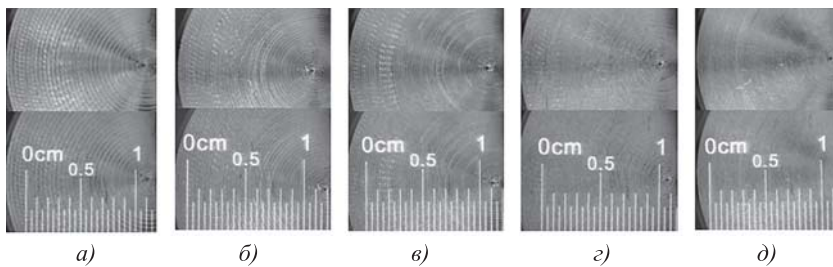
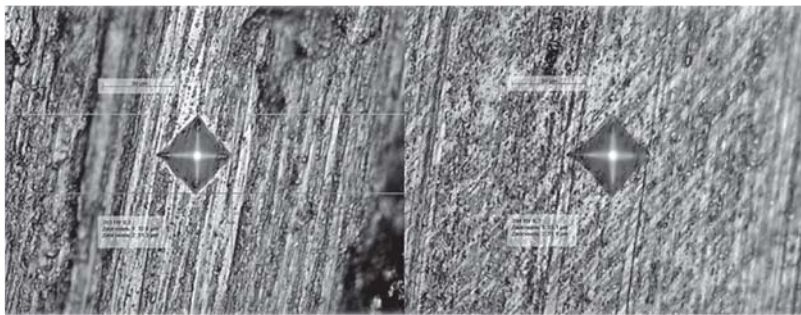
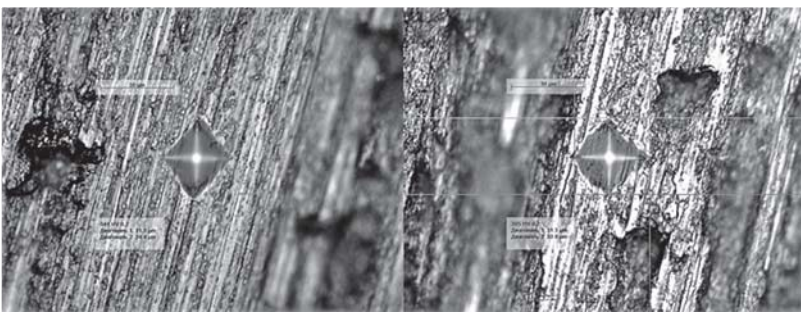


Рис. 5. Рельеф поверхности образцов с различной шероховатостью: а — $S = 0,12$ мм/об; $Ra = 6,3$ мкм; б — $S = 0,2$ мм/об; $Ra = 3,2$ мкм; в — $S = 0,25$ мм/об; $Ra = 2,5$ мкм; г — $S = 0,3$ мм/об; $Ra = 1,6$ мкм; д — $S = 0,4$ мм/об; $Ra = 0,8$ мкм



а)



б)

Рис. 6. Измерение по Виккерсу твердости поверхности трения: а — до испытаний; б — после испытаний

Образцы изготовили методом точения на различных технологических режимах: $v = 7,98$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $S = 0,12; 0,2, 0,25; 0,3; 0,4$ мм/об (рис. 5).

Шероховатость поверхности определяли на серийном профилографе-профилометре TR-200 фирмы Time Group. Микротвердость поверхностного слоя образцов измеряли на автоматическом микротвердомере Dugscan 20 (рис. 6). Достоверность полученных данных оценивали по критерию Стьюдента с вероятностью 0,95.

Рельеф после испытаний имел регулярный характер, причем среднее значение параметра шероховатости Rz , полученного в процессе выхода сопряжения на нормальный режим работы, составило 2,37 мкм. Среднее значение микротвердости по Виккерсу после испытаний при нагрузке 200 гс (1,96 Н) составило 379 МПа. Таким образом, значение равновесной степени наклепа составило 35 %.

Применение рассмотренного подхода позволит автоматизировать средствами САПР решение двух задач. Первая — конструкторская, связанная с назначением требуемых показателей качества поверхностей сопрягаемых деталей: шероховатости и степени наклепа. Вторая — технологическая, связанная с обеспечением этих требований через назначение соответствующих технологических условий обработки деталей. Для решения рассматриваемых задач предлагается методика, краткий алгоритм которой приведен на рис. 7. Этот алгоритм позволяет выполнить проверку предварительно назначенных показателей технологичности: шероховатости и наклепа рабочих поверхностей сопрягаемых деталей на этапе конструкторско-технологической подготовки производства.

В качестве исходных данных принимаются условия эксплуатации сопрягаемых деталей в узле трения, физико-механические свойства материалов сопрягаемых деталей. Расчет параметров равновесной шероховатости может быть выполнен на основе расчета безразмерного критерия Крагельского—Комбалова. На основе рассчитанного значения параметра равновесной шероховатости и геометрии рабочих поверхностей деталей осуществляется выбор метода обработки: точение, фре-



Рис. 7. Алгоритм методики технологического обеспечения равновесных параметров качества (трехмерной шероховатости и степени наклепа) на этапе конструкторско-технологической подготовки производства с учетом ГОСТ Р ИСО 4287—2014 и ГОСТ Р ИСО 25178-2—2014

зерование, шлифование или др. Далее рассчитываются функции базового профиля продольной и поперечной шероховатости поверхности по уравнениям (1) и (2). Расчет технологических условий

обработки выполняется на основе известных зависимостей, включающих параметры качества поверхностного слоя и технологические условия выбранных методов обработки поверхности заготовки. В зависимости от выбранного метода обработки формируются рекомендации по выбору смазочно-охлаждающей технологической среды.

На основе предложенного подхода сформированы основные уравнения для расчета продольной и поперечной шероховатости поверхностей деталей, получаемых токарной обработкой, с учетом ГОСТ Р ИСО 4287—2014 и ГОСТ Р ИСО 25178-2—2014, что позволяет рассчитывать координаты точек трехмерной шероховатости поверхности.

Полученные математические модели описания шероховатости обработанной поверхности в трехмерном измерении реализованы алгоритмически в разработанном программном обеспечении, позволяющем визуализировать картину образования шероховатой поверхности, получаемой механической обработкой, а также дальнейшее изменение шероховатости поверхности в процессе приработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Безъязычный В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
2. **Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.** М.: Машиностроение, 2001. 664 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Степнов М.Н., Зинин А.В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

М.: Инновационное машиностроение, 2016. 392 с.

Цена 1000 руб.

Монография содержит систематическое изложение существующих расчетных методов оценки характеристик сопротивления усталости традиционных конструкционных и новых композитных материалов на основе полимерной матрицы, а также методов расчета выносливости типовых элементов высоконагруженных конструкций.

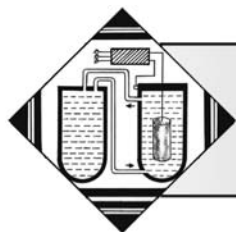
Методология расчетных методов определения характеристик выносливости основана на использовании статистических данных о характеристиках механических свойств материалов при кратковременном нагружении и экспериментально обоснованных моделях учета влияния различных факторов на несущую способность конструкций при циклическом нагружении. Показано, что применение предлагаемых расчетных методов обеспечивает достаточно высокую точность оценки характеристик сопротивления усталости, не уступающую показателям точности

экспериментальных исследований. Особое внимание уделено вопросам возможности оценки характеристик усталости полимерных композитных материалов в зависимости от их структурных параметров и особенностей механического поведения и механизмов усталостного разрушения.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторских и технологических бюро, лабораторий механических испытаний, научных сотрудников, аспирантов и студентов механических специальностей.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru



Е.В. Шеховцева
(ПАО "НПО "Сатурн"),

Т.В. Шеховцева

(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)

E-mail: JaneVSh@mail.ru

Упрочнение поверхностного слоя рабочих поверхностей зубчатых колес с помощью химико-термической обработки

Выполнено исследование влияния методов химико-термической обработки рабочих поверхностей зубьев с обоснованием выбора метода в зависимости от условий эксплуатации. Изучено изменение микротвердости поверхностного слоя рабочих поверхностей зубьев зубчатых передач газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации. Выполнен сравнительный анализ микроструктуры образцов, изготовленных с применением нитроцементации и ионного азотирования.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, микротвердость, микроструктура, зубчатое колесо.

The exploring of methods possibilities of teeth thermochemical processing with substantiation of choice methods according to the operation conditions was done. The modification of surface layer microhardness of GTE gear wheels teeth working surfaces was explored. The comparative analysis of samples microstructure, produced with the application of nitrocarburizing and ion nitriding, was done.

Keywords: thermochemical processing, microhardness, microhardness, gear.

Введение

Контактная прочность зубчатых колес зависит в основном от свойств и состояния материала вблизи поверхности, воспринимающей контактные нагрузки, формы поверхности контакта и условий нагружения со стороны других деталей, передающих контактные нагрузки.

Среди многочисленных методов обработки поверхностей деталей не все пригодны для образования рабочих поверхностей, воспринимающих контактные нагрузки. Это объясняется тем, что в большинстве случаев подобные поверхности должны быть гладкими, с плавными и геометрически точными очертаниями, а материал вблизи поверхности должен быть прочным, упругим, износостойким и в некоторых случаях твердым.

Контактную прочность, износостойкость и работоспособность зубчатых передач можно повысить двумя способами: конструкционным и технологическим. Среди технологических методов защиты рабочих поверхностей зубчатых колес выделяются такие, как применение механических, термических и химико-термических методов упрочнения поверхностей зубьев в зоне действия максимальных напряжений; увеличение точности изготовления передач, что существенно снижает динамические нагрузки. Это увеличивает изгибную прочность. Повысить сопротивляемость усталостным явлениям поможет повышение механических характеристик материалов зубчатых колес; применение различных видов упрочнения активных поверхностей зубьев и увеличение точности изготовления зубчатых колес.

Главным звеном технологического процесса, в наибольшей степени ответственным за качество поверхностного слоя зубьев, по праву считают технологию химико-термической обработки — нитроцементацию, а для определенной номенклатуры зубчатых колес газотурбинных двигателей (ГТД) — ионное азотирование. Именно эти технологические процессы формируют химический и фазовый состав поверхностного слоя, его структуру и основной уровень упрочнения.

Содержание исследования

Главное достоинство нитроцементации состоит в том, что этот процесс формирует диффузионные слои, обладающие высокой несущей способностью. При его рациональном проведении предел контактной выносливости повышается до 2200 МПа (на 60...100 %), предел выносливости при изгибе — до 1000 МПа (на 50...100 %), износостойкость — в 3...10 раз [1—3]. Однако нитроцементация в сочетании с последующим термическим упрочнением вызывает существенную деформацию зубчатых колес. Точность ажурных авиационных зубчатых колес снижается на 2—3 степени и более. Для восстановления точности требуется проведение зубошлифования — трудоемкой операции, усложняющей технологию.

Ионное азотирование свободно от этого недостатка. Основное достоинство этого процесса — отсутствие при упрочнении поверхностного слоя зубьев значительных деформаций и коробления, что дает возможность исключить зубошлифовальную операцию. Вместе с тем при азотировании формируются диффузионные слои ограниченной толщины (не более 0,5 мм), что снижает уровень допустимых контактных нагрузок и, как следствие, сужает номенклатуру обрабатываемых деталей [4, 5]. На рис. 1 хорошо видно равномер-

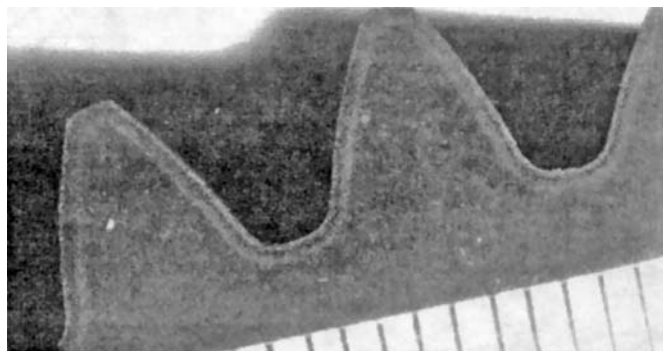


Рис. 1. Распределение азотированного слоя по профилю зуба шестерни

ное по толщине распределение азотированного слоя по поверхности профиля зуба шестерни из стали 18Х2Н4МА.

В процессе эксплуатации авиационных ГТД происходит износ азотированного слоя на функциональных поверхностях ряда деталей, работающих в жестких условиях трения при повышенных контактных нагрузках и температурах. В результате износа азотированного слоя снижаются поверхностная твердость, коррозионная стойкость, прочностные свойства и износостойкость слоя. При ремонте деталей авиационных ГТД с изношенным азотированным слоем восстанавливается толщина и свойства слоя.

Оптимальными параметрами термической обработки при ионном азотировании являются глубина упрочняемого слоя 0,2...0,4 мм, твердость поверхностного слоя не менее 80 HRC и сердцевины — 321...388 HB (36,5...42,5 HRC).

При нитроцементации образуется твердый износостойкий слой при высоком уровне сжимающих напряжений на поверхности и небольшой степени деформации вследствие низкой температуры закалки и отсутствия фазовых превращений в сердцевине. Детали приобретают высокое сопротивление усталости и износостойкость.

Достоинства нитроцементации:

- возможность получения более износостойкого слоя;

- увеличение глубины прокаливания нитроцементованного слоя вследствие насыщения его азотом;

- возможность регулировать насыщение слоя азотом и углеродом путем изменения скорости подачи аммиака и масла;

- повышение прочности при изгибе и сопротивления усталости;

- более высокое сопротивление контактной усталости;

- уменьшение деформаций и коробления изделий.

Нитроцементация значительно повышает предел выносливости конструкционных сталей. Особенно она эффективна при наличии концентраторов напряжений. Влияние ее тем существеннее, чем меньше размеры детали и чем выше концентрация напряжений.

В настоящее время общепринято, что причиной благоприятного влияния нитроцементации на сопротивление усталостному разрушению является возникновение в слое сжимающих внутренних напряжений I рода. Эффект поверхностного упрочнения при нитроцементации зависит от отношения диаметра сердцевины к толщине слоя. Эта зависимость имеет экстремальный характер, так как при значительной глубине диф-

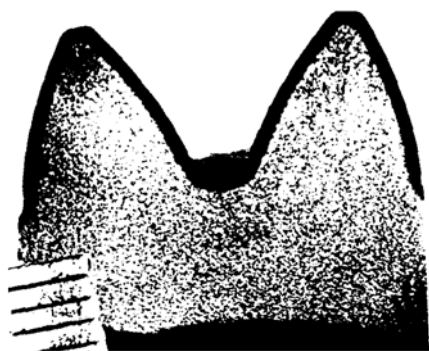


Рис. 2. Распределение цементованного слоя по профилю зуба

фузионной зоны среднее значение сжимающих напряжений в слое снижается.

Сжимающие напряжения на поверхности азотированного слоя несколько выше, чем нитроцементованного, однако сопротивление усталости цементованной и нитроцементованной стали значительно выше, чем азотированной. Это обусловлено меньшей прочностью сердцевины после азотирования и улучшения, так как разрушение во всех рассмотренных случаях происходило в подслое. Микроструктура цементированного слоя показана на рис. 2.

Таким образом, на выносливость нитроцементованных деталей оказывает влияние не только прочность поверхностного слоя, но и прочность сердцевины, которая зависит от содержания углерода и легирующих элементов стали.

Повышение предела прочности и пластичности диффузионного слоя после химико-термической обработки при равной прочности сердцевины значительно улучшает эксплуатационное качество изделий.

Контактная прочность после нитроцементации тем выше, чем больше толщина слоя и выше твердость сердцевины. Это имеет большое значение при работе зубчатых колес в условиях высоких контактных напряжений, так как они испытывают одновременно высокие контактные и изгибные циклические нагрузки.

Оптимальными параметрами термической обработки при нитроцементации являются глубина упрочненного слоя 0,6...1,2 мм, твердость поверхностного слоя не менее 59 HRC и сердцевины — 33...45 HRC.

Следует отметить, что основным недостатком азотирования является тонкий упрочненный слой (в 3 раза тоньше нитроцементованного слоя), который плохо сопротивляется перегруз-

кам. Это объясняется возникновением разрушений под упрочненным слоем, что может привести к снижению базового числа циклов наработки или уменьшению воспринимаемой им нагрузки.

Исследование методов химико-термической обработки зубьев зубчатых колес из высоколегированных сталей показало, что процесс нитроцементации представляет собой резерв повышения эксплуатационных свойств зубчатых колес ГТД в результате меньшей разницы в твердости упрочненного поверхностного слоя и сердцевины и большей глубины диффузионного слоя. По ряду достоинств нитроцементации этот процесс упрочнения является предпочтительнее, чем ионное азотирование, несмотря на возникающие коробления после химико-термической обработки, которые устраняются последующей обработкой. При этом минимальная контактная нагрузка для нитроцементованных слоев по ГОСТ 21354—87 составляет 1357 МПа при твердости поверхностного слоя 59 HRC и может пропорционально повышаться. Для ионного азотирования предел контактной нагрузки постоянный (ГОСТ 21354—87) — 1050 МПа.

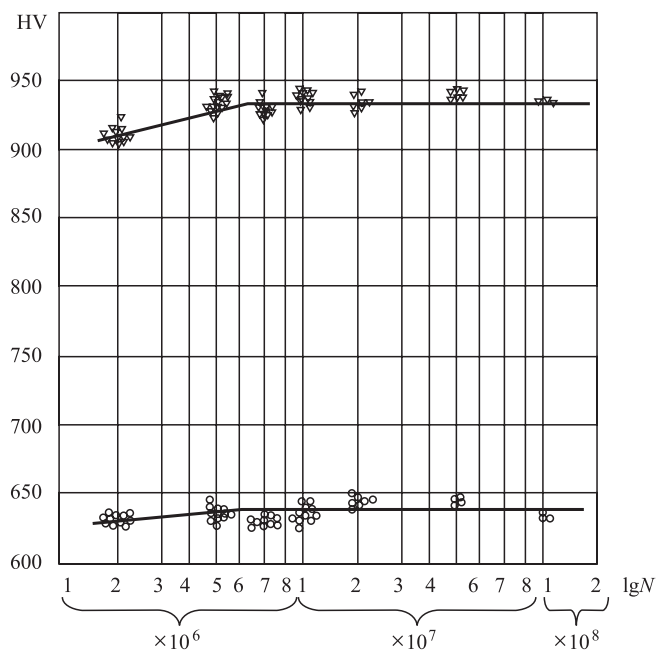


Рис. 3. Изменение микротвердости рабочих поверхностей в процессе эксплуатации образцов, изготовленных из сталей 20X3MVФ-Ш, 18X2H4MA и 12X2H4A:

○ — с нитроцементацией; ▽ — с ионным азотированием; N — число циклов нагружения

Максимальная нагрузка при изгибе по ГОСТ 21354—87 для нитроцементации — 980 МПа; для ионного азотирования — 950 МПа.

На основании анализа возможностей методов химико-термической обработки рекомендуется их применение в зависимости от условий эксплуатации зубчатых передач: нитроцементация эффективна при изготовлении тяжело нагруженных и высокоскоростных зубчатых передач силовых и агрегатных веток кинематических цепей; ионное азотирование целесообразно применять для мало нагруженных и тихоходных зубчатых передач либо в условиях высоких окружных скоростей, но при ограниченных контактных нагрузках из-за небольшой протяженности диффузионного слоя.

Сравнительные результаты изменения микротвердости образцов в процессе эксплуатации рабочих поверхностей для испытываемых образцов из материалов 20Х3МВФ-Ш, 18Х2Н4МА и 12Х2Н4А представлены на рис. 3. Микротвердость измеряли по восстановленному отпечатку (по глубине отпечатка). На графике четко виден участок приработки, а затем участок нормальной работы, на котором твердость остается практически постоянной.

После испытаний рабочих поверхностей образцов определяют микроструктуры контактирующих поверхностей. На рис. 4 представлена микроструктура поверхности образца с нитроцементацией из материала 20Х3МВФ-Ш (ЭИ415-Ш).

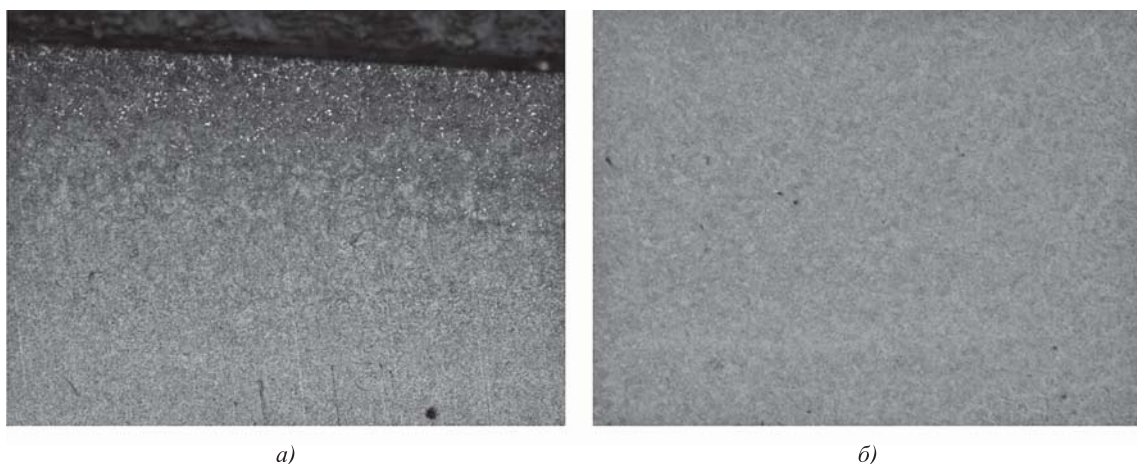


Рис. 4. Микроструктура образца из материала 20Х3МВФ-Ш, изготовленного с применением нитроцементации, $\times 200$:

a — микроструктура поверхностного слоя; *б* — структура сердцевины

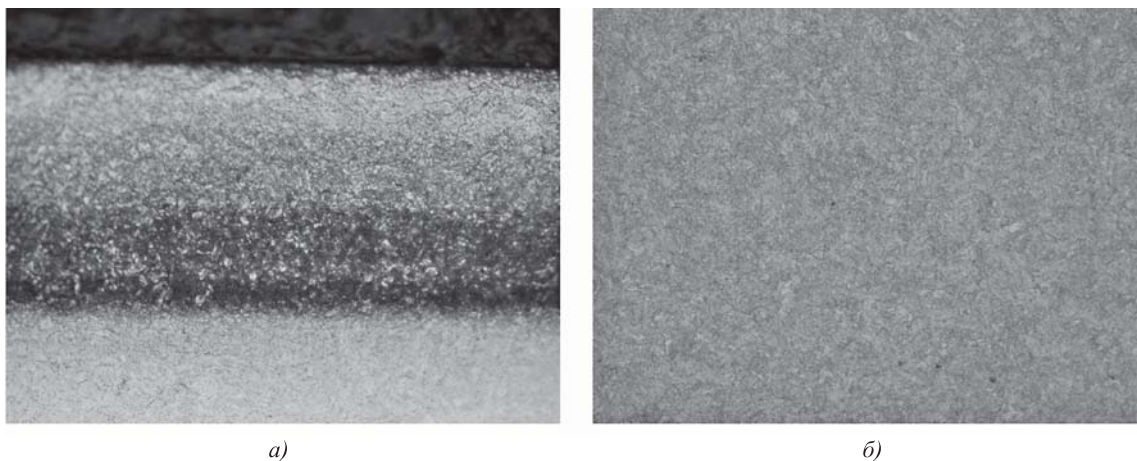


Рис. 5. Микроструктура образца из материала 20Х3МВФ-Ш, изготовленного с применением ионного азотирования, $\times 200$:

a — микроструктура поверхностного слоя; *б* — структура сердцевины

Микротвердость поверхностного слоя составляет 647 НВ, твердость сердцевины — 42 НРС, глубина нитроцементованного слоя — 0,7 мм, число циклов нагружения — $1,3 \cdot 10^8$.

На рис. 5 представлена микроструктура поверхностного слоя образца, изготовленного лезвийной обработкой, шлифованием с последующим ионным азотированием, из материала 20Х3МВФ-Ш. Микротвердость поверхностного слоя — 949 НВ, твердость сердцевины — 375 НВ, глубина упрочненного слоя — 0,28 мм, число циклов нагружения — $1,27 \cdot 10^8$.

Заключение

Сравнение возможностей методов химико-термической обработки зубьев позволило сделать вывод об их равнозначности и целесообразности применения нитроцементации и ионного азотирования для повышения нагрузочной способности рабочих поверхностей зубьев с учетом условий эксплуатации зубчатых передач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. М.: Высш. шк., 2001. 493 с.
2. Гузанов Б.Н., Мигачева Г.Н., Большакова М.Ю. Влияние структуры и состава цементованного слоя на работоспособность тяжело нагруженных зубчатых колес // Вестник машиностроения. 2006. № 3. С. 37—38.
3. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фарутдинов Р.С. Особенности вакуумной цементации теплостойкой стали в ацителене // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 6. С. 10—15.
4. Рыжов Н.М., Громов В.И. Ионная химико-термическая обработка деталей ГТД // Литейное производство. 2003. № 1. С. 17—18.
5. Фомина Л.П. Новые технологии упрочнения зубчатых колес газотурбинных двигателей // Новые материалы и технологии. НМТ-2006. В 3 т. Т. 2. Проектирование, производство и эксплуатация изделий машиностроения: тез. докл. науч.-техн. конф. М., МАТИ, 2006. С. 186.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАРКИ СПРАВОЧНИК

Осинцев О.Е., Федоров В.Н.

2-е изд., перераб. и доп. 2016. 360 с.

Цена 1300 руб.

В справочнике впервые систематизированы и обобщены сведения о физических, механических и технологических свойствах почти всех марок меди и сплавов на ее основе: латуней, бронз, медно-никелевых сплавов, а также специальных медных сплавов: микролегированных, дисперсно-упрочненных, с эффектом памяти и др. Показано влияние легирующих элементов и примесей на свойства сплавов. Изложены сведения о составе и структуре, особенностях термической обработки, даны двойные и многокомпонентные диаграммы состояния, определяющие фазовый состав. Приведены также сведения о свойствах зарубежных аналогов отечественных медных сплавов. 2-е издание (1-е издание 2004 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами, а также дополнено сведениями по припоям на основе меди.

Для инженерно-технических работников машиностроительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятий, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также для студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений и университетов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.

Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru



УДК 621.7

В.Ф. Безъязычный

(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва),

Н.В. Румянцева, С.Н. Бардинова, А.В. Смирнов

(ПАО "Научно-производственное объединение "Сатурн", г. Рыбинск)

E-mail: tehnology@rsatu.ru

Использование упрочняющих методов обработки при ремонте лопаток компрессора газотурбинных двигателей

Рассмотрен производственный опыт ремонта лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) методами нанесения покрытий и наплавки, а также результаты исследования качества реализации ремонтных технологий.

Ключевые слова: эксплуатационные дефекты, ремонт деталей ГТД, наплавка, покрытие, микротвердость, остаточные напряжения.

This article describes the operational experience of the repair of compressor blades of gas turbine engine (GTE) by methods of coating and surfacing, as well as the results of a study of the quality of repair technology.

Keywords: performance defects, repair of GTE parts, welding, coating, microhardness, residual stresses.

На эффективность работы авиационного двигателя непосредственное влияние оказывают параметры компрессора и турбины, а также степень совершенства их лопаточных венцов, качество конструкций лопаток.

Надежность газотурбинных двигателей (ГТД) зависит от качества работы лопаток компрессора и турбины, поскольку они являются наиболее нагруженными деталями. В процессе работы лопатки компрессора подвержены воздействию центробежных сил, обусловленных их собственными массами, и аэродинамических сил, обусловленных воздушным потоком. Центробежные силы вызывают в лопатках напряжения растяжения, изгиба и кручения. Эти силы зависят от массы лопатки, радиуса, на котором расположен центр масс лопатки, и окружной скорости. Аэродинамические силы вызывают в рабочих лопатках напряжения изгиба и кручения.

Основными причинами разрушения лопаток компрессора являются высокий уровень динамических напряжений, недостаточная конструктивная прочность лопаток и эрозионный износ их поверхности. Анализ дефектов рабочих лопаток компрессора двигателя, возникающих в результате изнашивания, показывает, что происходит ускоренный износ трущихся поверхностей в сопряжениях вследствие несовершенства технологий получения материала и изготовления деталей. Изготовление новых деталей взамен изношенных достаточно дорого, поэтому исследование механизма износа деталей, разработка перспективных методов ремонта и выполнение ремонта двигателей с использованием восстановленных деталей являются важными и экономически целесообразными.

Постоянное совершенствование технологических процессов восстановления изношенных поверхностей и внедрение перспективных методов ремонта авиационных ГТД должны обеспечивать их эксплуатационную надежность.

Материал компрессорных лопаток работает на пределе своих возможностей. При ремонте необхо-

димо обеспечить максимальный резерв прочности. В связи с этим требуемый ресурс работы отремонтированных лопаток может быть достигнут только путем максимального приближения к структуре исходного материала и размерам новой лопатки, обладающей максимальными эксплуатационными свойствами в заданных условиях работы.

Рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя Д-30КУ/КП (рис. 1) изготавливаются из жаропрочного титанового сплава ВТЗ-1. Для демпфирования колебаний и снижения вибрационных напряжений при работе двигателя лопатки первой ступени ротора компрессора низкого давления имеют бандажные полки, которые в собранном виде образуют кольцевой antivибрационный бандаж.

Минимальный зазор, при котором отсутствует касание торцов лопаток по внутренним поверхностям направляющих аппаратов, определяется допусками на их изготовление и теплофизическими свойствами материалов, из которых они изготовлены. Ремонт рабочих лопаток заключается в восстановлении высоты лопатки для обеспечения зазора, уменьшающего перетекание воздуха для обеспечения заданных характеристик двигателя, а для лопаток с бандажными полками — в восстановлении натяга между ними. Следует отметить, что лопатки являются тонкостенными и имеют

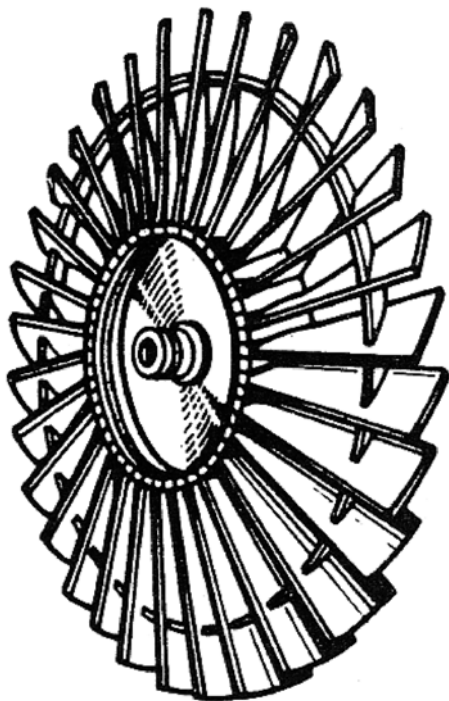


Рис. 1. Рабочее колесо первой ступени ротора компрессора низкого давления

концентраторы напряжений в виде радиусов перехода от пера к полке.

При разработке технологического процесса ремонта высоконагруженных деталей авиационных двигателей необходимо исходить из задачи обеспечения требуемых точности и формы поверхностей, а также благоприятного сочетания свойств поверхностного слоя и требуемой удельной прочности.

Исследования показали, что при использовании нерациональных методов ремонта и режимов обработки титановых сплавов в поверхностном слое могут возникнуть дефекты в виде прижогов различной интенсивности, которые образуют слой с измененными микроструктурой и химическим составом, микротрещинами, рисками, шламом во впадинах микронеровностей и др.

Восстановление высоты лопатки выполняется несколькими способами: наплавкой торцевой поверхности и напылением подошвы. При выборе материала для наращивания учитываются требования, которые обеспечивают достаточную удельную прочность, износостойкость и сохраняют необходимую надежность отремонтированных деталей. Для повышения ремонтпригодности деталей выполняются работы по выбору и обоснованию материала для напыления и наплавки в зависимости от основного сплава, разработке и апробированию технологии ремонта с последующим исследованием качества проведенного ремонта.

Восстановление поверхностей и придание им особых свойств за счет нанесения дополнительного материала — покрытия связаны с необходимостью обеспечить прочное взаимодействие покрытия с подложкой. В процессе нанесения покрытий не должны быть снижены уровни прочности и выносливости материала подложки. Выбор метода ремонта при разработке технологии определялся необходимостью обеспечения адгезии основного материала с материалом покрытия, сохранения физико-химических свойств материала и получения требуемых прочностных характеристик. Для восстановления замка лопатки использовали метод плазменного напыления материала покрытия ВМ-30 (рис. 2).

Покрытия напыляли на установке MultiCoat. Адгезионную прочность обеспечили подготовкой основного материала под напыление механическим способом (шлифованием), который не изменил структуру материала. В то же время полностью удалены загрязнения на поверхностях, которые в дальнейшем подвергались напылению.

После выполнения плазменного напыления отклонения от требуемой геометрии поверхности,

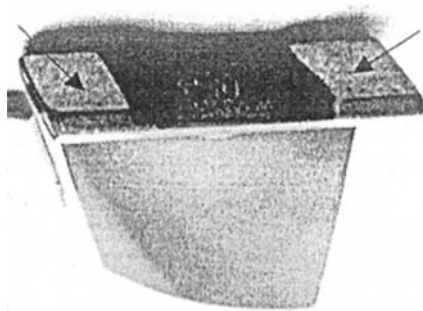


Рис. 2. Поверхность замка лопатки компрессора. Стрелками указаны восстановленные поверхности с нанесенным покрытием ВМ-30

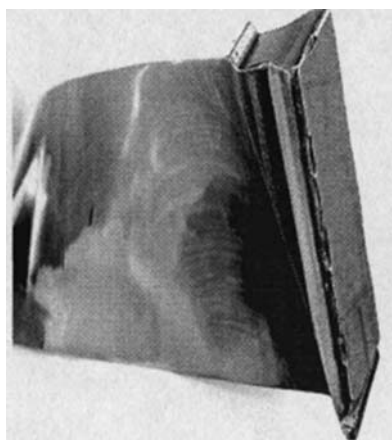


Рис. 3. Замок лопатки, восстановленный аргонодуговой наплавкой

наружные и внутренние дефекты не выявлены. Распределение толщины покрытия на замке было равномерным.

Металлографический анализ переходной зоны "покрытие — основной материал" показал, что при напылении покрытие ВМ-30 плотно прилегает к основному металлу, так что границу между ними практически можно наблюдать только после травления.

Восстановление геометрии деталей путем нанесения покрытий имеет некоторые ограничения, в том числе и по максимальной толщине покрытия. Поэтому при высокой степени износа поверхностей более целесообразно применять такие методы восстановления поверхностей, как сварка и наплавка. Восстановление высоты рабочей лопатки выполняется за счет восстановления замковой части и пера. Высоту замковой части лопатки увеличивают различными способами: аргонодуговой наплавкой (рис. 3) и контактной сваркой (рис. 4) пластины и замковой части лопатки.

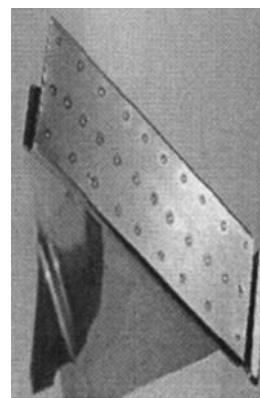


Рис. 4. Замок лопатки, восстановленный контактной сваркой

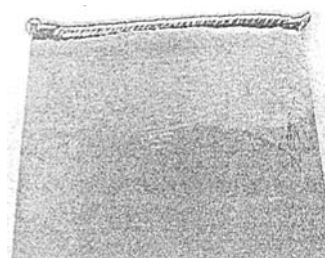


Рис. 5. Лопатка с наплавкой торца пера



Рис. 6. Лопатка после ремонта методом наплавки торца пера

Для восстановления торца лопатки отработывали технологию наплавки методом ручной аргонодуговой сварки материалом ВТ1-00 (рис. 5, 6). Максимальная высота наплавленного сплава ВТ1-00 после механической обработки составила 0,10...0,74 мм. Качество наплавки определяли внешним осмотром, замером геометрических размеров, контролем ЛЮМ1-ОВ, замером остаточных напряжений и твердости материала.

Контролем на приборе ЛЮМ-ОВ поверхностных дефектов на лопатках не выявлено. На лопатках определены остаточные напряжения сжатия (рис. 7), которые определяли рентгеноструктурным методом.

При исследовании макроструктуры наблюдается зона термического влияния с измененными

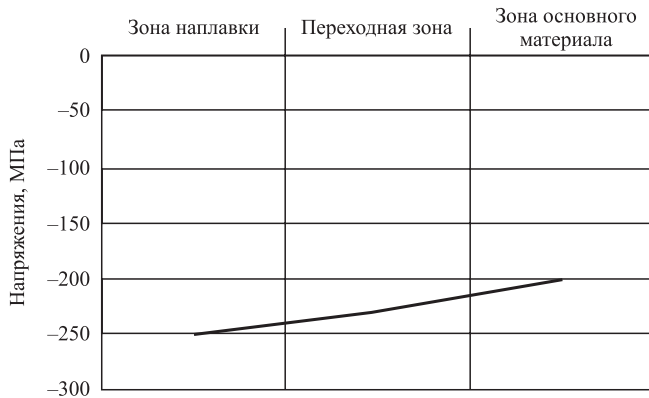


Рис. 7. Результаты замера остаточных напряжений на торцах лопатки после наплавки



Рис. 8. Макроструктура в поперечном сечении пера лопатки (наплавленная поверхность указана стрелкой)



Рис. 9. Микроструктура основного материала (VT3-1)

макро- и микроструктурой. Размер зоны термического влияния на перо лопатки составляет 1,1...1,4 мм. Макроструктура основного материала на удалении от зоны наплавки матовая (рис. 8). В зоне наплавки и в зоне термического влияния микроструктура с блестящим фоном, представленная крупными зернами, что характерно для наплавки (рис. 9...11).

Исследование микротвердости материала показало, что микротвердость в зоне термического влияния выше микротвердости основного материала, что связано с изменением структуры сплава в процессе наплавки (рис. 12).

Кроме того, отработывали технологию лазерной порошковой наплавки торцов пера. Наплавку

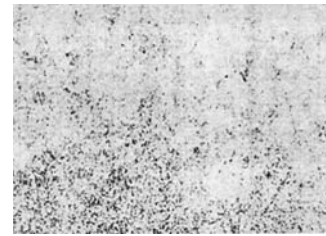


Рис. 10. Микроструктура лопатки в зоне термического влияния (ближе к основному материалу)

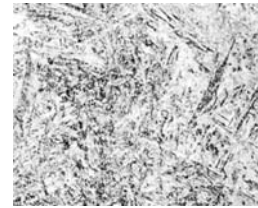


Рис. 11. Микроструктура лопатки в зоне наплавки сплава VT1-00

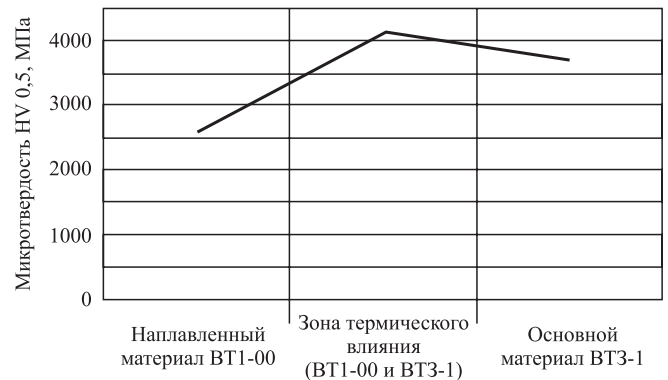


Рис. 12. Результаты замера микротвердости на торцах лопаток при наплавке материалом VT1-00

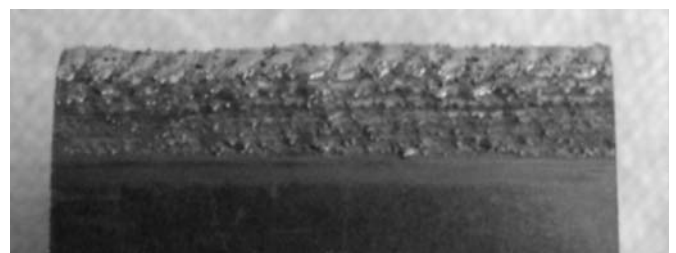


Рис. 13. Образец с наплавкой на торцевой поверхности материала Ti6Al4V

выполняли на лазерной установке Optomes Lens 850R материалом Ti6Al4V (рис. 13).

Для определения качества наплавки было выполнено исследование макро- (рис. 14) и микроструктуры (рис. 15) опытного образца в зоне наплавки. Внешним осмотром наплавленного слоя

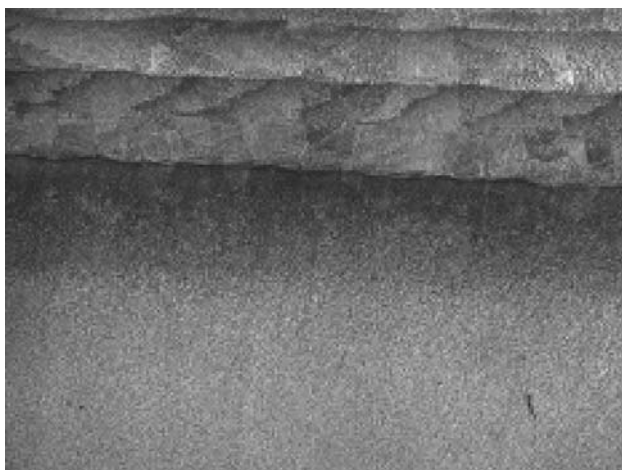


Рис. 14. Микроструктура материала в зоне наплавки



Рис. 15. Микроструктура материала наплавки после травления

установлено, что микроструктура материала наплавки многослойная, литая крупноугольчатая, наблюдается сплавление основного материала образца и наплавленного материала с образованием диффузионной зоны; дефекты в диффузионной зоне типа пор, трещин, раковин не выявлены (см. рис. 14, 15). Размер зоны термического влияния опытного образца составляет около 1,5 мм.

Процесс ремонта деталей ГТД является сложным технологическим и инженерным решением, при реализации которого требуется применить оптимальные способы и виды ремонта, выбрать материалы с достаточной удельной прочностью, сохранить необходимую надежность отремонтированных деталей, кроме того, необходимо учитывать экономическую целесообразность применения того или иного метода ремонта. Выбор способа ремонта определяется площадью контактирующих поверхностей. При использовании рассмотренных методов ремонта решается задача наращивания высоты лопатки. Применение покрытий для восстановления изношенных поверхностей имеет ряд преимуществ по сравнению с наплавкой, в том числе отсутствие зоны термического влияния, однако данный процесс не всегда может быть осуществим ввиду ограничения по толщине слоя покрытия. Среди недостатков наплавки различными способами можно отметить, неравномерную толщину наплавленного слоя: от 1,0 до 1,8 мм и достаточно большой размер зоны термического влияния.

ООО "Издательство "Иновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.
Учредитель ООО "Издательство "Иновационное машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru.

Web-site: www.mashin.ru.

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.

Технический редактор Конова Е.В. Корректор Сажина Л.И.

Сдано в набор 31.05.2017 г. Подписано в печать 19.07.17 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru

POWER ELECTRONICS

Ufi
Approved
Event

14-я Международная выставка
компонентов и систем
силовой электроники

24-26 октября 2017
Москва, Крокус Экспо

Организаторы:



+7 (812) 380 6003 / 07 / 00
power@primexpo.ru

Подробнее о выставке:
powerelectronics.ru

