ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 9 сентябрь 2009

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А.
КОЛЕСНИКОВ А.Г.

Зам. Главного редактора:
КЛЕЙЗЕР П.Е.
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЖЕСТКОВА И.Н.
ЗАРУБИН А.М.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ В.И.
ТРУХОВ А.П.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ДЮБКОВА Н.В.
СЕРИКОВА Е.А.
МАКАРЕНКО Е.Д.
ГАНЖЕНКО А.Г.

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12218 от 29.03.02

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу агентства "Роспечать" **81580**, по Объединенному каталогу "Пресса России" **39205**, по каталогу "Почта России" **60261**) или непосредственно в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Факс: (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Роготовский А.Н., Шипельников А.А. Особенности модифицирования "нирезиста" на шаровидный графит для производства отливок насосных агрегатов . . . 3
Корневич А.П., Семёнов Б.И., Чуфринова Я.В., Шилло Г.В. Особенности технологии сварки трением с перемешиванием . . . 7
Гуреева М.А., Овчинников В.В., Феклистов С.И., Рязанцев В.И., Данилкин С.В. Технологические особенности аргонодуговой сварки жаропрочных алюминиевых сплавов . . . 15

Кузнечно-штамповочное производство

Власов А.В. Моделирование поперечных вибраций автомата АО334 на холостых ходах . . . 21
Семеноженков М.В., Крук А.Т., Пешков В.В. Рационализация схем нагружения элементов конструкций из титана при их сварке давлением . . . 26
Свистунов В.Е., Чубуков В.А., Матвеев А.Г., Гартвиг А.А. Проектирование кривошипных кузнечно-прессовых машин с использованием соотношений подобия . . . 30

Прокатно-волочильное производство

Бурлаков И.А. Способы получения заготовок из сплава ЭП742 с мелкозернистой структурой для последующей изотермической раскатки . . . 38

Материаловедение и новые материалы

Матвеев А.С., Гадалов В.Н., Крючков К.А., Григорьев С.Б., Мелихов А.Е. Технологические решения при изготовлении слоистых металлических материалов . . . 43
Шиков А.К., Воробьёва А.Е., Дергунова Е.А., Тронза В.И., Фигуровский Д.К. Разработка методики оценки размеров конструктивных элементов в полуфабрикатах сверхпроводников на основе Nb_3Sn . . . 46
Гарибов Г.С. К вопросу о выборе технологии и оборудования для производства высококачественных гранул крупностью менее 100…70 мкм при изготовлении критических компонентов современных и перспективных авиационных газотурбинных двигателей. (*Продолжение*) . . . 49

Информация

Промышленные выставки в октябре–декабре 2009 г. . . . 54

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

Журнал выходит при содействии:
Академии Проблем Качества Российской Федерации; Министерства образования и науки Российской Федерации; Воронежского завода тяжелых механических прессов; ЦНИИЧермет; ВНИИМЕТМАШ; ИМЕТ РАН; Каширского завода "Центролит"; АМУРМЕТМАШ

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2009

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 9 September 2009

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief
SEMENOV E.I.

Chairman Assistants:
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistants:
KLEYZER P.E.
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee:
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
BOKOV A.A.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
ZHESTKOVA I.N.
ZARUBIN A.M.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
TRUKHOV A.P.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialists:
DYUBKOVA N.V.
SERIKOVA E.A.
MAKARENKO E.D.
GANZHENKO A.G.

Journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. The certificate of registration ПИ № 77-12218 from 29.03.02

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **81580**, on the united catalogue "Pressa Rossii" **39205**, catalogue "Pochta Rossii" **60261**) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Fax: (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Rogotovsky A.N., Shipelnikov A.A. Features of «nirezist» inoculation on spheroidal graphite for manufacture pump units castings . . . 3
Kornevich A.P., Semenov B.I., Chyufrinova Ya.V., Shillo G.V. Features of the friction stir welding technology . . . 7
Gureeva M.A., Ovchinnikov V.V., Feklistov S.I., Ryazantsev V.I., Danilkin S.V. Technological special features of the argon-arc welding of the high-temperature aluminum alloys . . . 15

Forging and Stamping Productions

Vlasov A.V. Simulation of cross-section oscillations of automatic machinery AO334 on no-load operations . . . 21
Semenozhenkov M.V., Kruk A.T., Peshkov V.V. The rationalization of load schemes on titanium construction elements under pressure welding conditions . . . 26
Svistunov V.E., Chubukov V.A., Matveev A.G., Gartvig A.A. Designing of crank fording machines using correlation of similarity . . . 30

Rolling and Drawing Productions

Burlakov I.A. The ways production of fine-grained performs of nickel-alloy EP742 for isothermal rolling . . . 38

Physical Metallurgy and New Materials

Matveev A.S., Gadalov V.N., Kryuchkov K.A., Grigorev S.B., Melikhov A.E. Technological decisions by manufacturing of layered metal materials . . . 43
Shikov A.K., Vorobeva A.E., Dergunova E.A., Tronza V.I., Figurovsky D.K. Development of the estimation method of element sizes in Nb_3Sn superconductor's semi-finished products . . . 46
Garibov G.S. On the problem of choice of the technology and equipment for production of high quality powders below 100...70 μm in size to manufacture critical components for up-to-date and advanced aircraft gas-turbine engines. (*Continuation*) . . 49

Information

Industrial exhibitions in October–December 2009 . . . 54

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses

Reprint is possible only with the reference to the journal "Blanking productions in mechanical engineering"

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2009

УДК 669.187

А.Н. Роготовский, А.А. Шипельников *(Липецкий государственный технический университет)*

Особенности модифицирования "нирезиста" на шаровидный графит для производства отливок насосных агрегатов*

Рассмотрены особенности и проблемы производства сложных фасонных отливок из чугуна "нирезист" с шаровидным графитом для насосных агрегатов. Приведены результаты исследования химического состава, свойств и структуры чугунов с использованием методик сканирующей зондовой микроскопии.

The characteristics and problems of manufacturing complex shaped castings of spheroidal graphite iron "nirezist" for pumping units are considered. The results of the study of chemical composition, structure and properties of cast iron by thechniques of scanning probe microscopy are given.

Ключевые слова: "нирезист"; чугун; шаровидный графит; модифицирование; отливка.

Keywords: "nirezist"; cast iron; shperoidal graphite; modification; casting.

Чугун с шаровидным графитом (ЧШГ) продолжает оставаться наиболее востребованным конструкционным сплавом с хорошими литейными свойствами, который применяют в различных отраслях тяжелого и легкого машиностроения. Например, для производства отливок агрегатов нефтедобывающей промышленности используют, как правило, легированные и высоколегированные чугуны с шаровидным графитом, к которым предъявляют жесткие требования в специфических условиях эксплуатации: высокая коррозионная стойкость, стойкость к истиранию и разрушению структуры, жаропрочность, низкий коэффициент магнитной восприимчивости. Всем этим требованиям удовлетворяет никелево-медистый чугун типа ЧН15Д7 или его зарубежный аналог ЧН16Д7ГХШ, который перед заливкой форм дополнительно подвергают сфероидизирующей обработке.

Существует более 30 запатентованных марок чугунов, высоколегированных медью и никелем, отличающихся между собой концентрациями меди, никеля, хрома, марганца и типом включений графита – от равномерно распределенного пластинчатого до правильной формы шаровидного. Данные различия для операций выплавки и заливки чугунов не вносят фундаментальных изменений в серийную технологию, поэтому в производственной практике чугуны этой группы принято называть "нирезист".

Известно, что "нирезист" плохо поддается обработке на шаровидный графит: в большинстве случаев образуется ледебуритно-цементитная матрица с включениями шаровидного графита разорванной или правильной формы размерами от 15 до 90 мкм. Это приводит к увеличению поверхностной твердости отливок до 300 НВ и, как следствие, к снижению производительности механической обработки на агрегатных станках-полуавтоматах.

Главная причина в том, что серийный "нирезист", как правило, содержит большое количество карбидообразующих элементов (до 1,5 % Mn и до 3,0 % Cr), при этом основные легирующие элементы (до 17 % Ni и до 8 % Cu) являются антиглобуляризаторами [1–3]. Следует также отметить, что "нирезист" еще до модифицирования обладает средни-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-08-97578-р_центр_а.

1. Элементарный химический состав доменных чугунов*

Производитель	Ni	Cr	V	Ti	As	Al	Pb	B	Ce
ОАО "ЛМЗ"	0,024	0,023	0,006	0,017	0,004	0,002	0,001	0,001	0,003
ОАО "КМЗ"	0,013	0,006	0,002	0,015	0,004	0,002	0,001	0,000	0,002
ОАО "НЛМК"	0,006	0,017	0,006	0,017	0,001	0,003	0,003	0,000	0,005

* Содержание остальных элементов соответствует содержанию по ГОСТ 805–97.

ми литейными свойствами по сравнению с серыми чугунами: повышенной склонностью к объемной усадке и плохой жидкотекучестью (300...400 мм при температуре перегрева 100...250 К).

Поэтому поиск эффективной технологии модифицирования "нирезиста" является важной задачей литейного производства машиностроительных заводов, ориентированных на выпуск агрегатов для перекачки нефти и агрессивных пластовых жидкостей.

Целью исследования является определение влияния параметров технологии модифицирования на структуру и свойства высоколегированного чугуна "нирезист".

Конструкционные чугуны выплавляли в индукционной печи ИСТ 0,4 с кислой футеровкой в течение 100...120 мин. Применяли стопочную формовку по технологии cold-box-amin-процесса.

Температура модифицирования и заливки проб составляла 1723...1823 К. Температуру замеряли погружной термопарой "Дижитемп" (тип "S").

Металлографический анализ осуществляли на темплетах, полученных путем разреза отливок вдоль и поперек зоны подвода питания, с помощью оптического микроскопа "Olimpus" GX51 и сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) платформы "Сольвер Р47-Н".

Химический состав чугунов контролировали на кокильных образцах, заливаемых с того же ковша, что и партия отливок, на оптико-эмиссионном спектрометре "ARL-3440".

Испытание чугунов на прочность проводили на разрывной машине ГСЛ-20, на поверхностную твердость – на твердомере ТК-2М.

Для снижения склонности чугуна к отбелу структуры было снижено содержание марганца и хрома до 1,0 и 1,6 % соответственно относительно их содержания по ГОСТ 805–97.

В шихте использовались доменные чугуны марок Л5 производства ОАО "Косогорский металлургический завод" ("КМЗ") и ОАО "Липецкий металлургический завод" ("ЛМЗ") и П2 производства ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат" ("НЛМК") (табл. 1).

Модифицирование проводилось в открытых чайниковых ковшах емкостью 50 кг. За 8...10 мин до выпуска плавки после удаления печного шлака на "зеркало" металла вводилась навеска дробленого графита марки ГС фракцией до 2 мм в количестве 0,10...0,15 % при температуре выдержки 1773 К. Заливка стопочных форм осуществлялась на плаце после выдержки в течение 2...3 мин для усвоения модификатора и удаления шлака с помощью коагулянта шлака "Remmos 100G".

Результаты работ приведены в табл. 2.

В статье не приводится сводная таблица экспериментов по влиянию типа и количества лигатуры на структуру ЧШГ, так как ее формирование и отработка проводились в течение длительного времени в многочисленных экспериментальных плавках.

В табл. 2 под литейным браком подразумевается процент забракованных отливок по превалирующим видам дефектов, таких как спай, недолив и раковины, по размеру превышающих допуск на механическую обработку отливок (рис. 1).

Таким образом, даже при использовании технологии изготовления стержней-форм по cold-box-amin-процессу и стопочной формовке необходимо корректировать литниково-питающую систему отливок в сторону увеличения сечения питателей при одновременном завышении припуска на механическую обработку. Исходя из производственного опыта данное обстоятельство, по-видимому, является неизбежным при модифицировании "нирезиста" на шаровидный графит.

Параметр оценки качества чугунов "обрабатываемость" включает в себя отношение расхода режущего инструмента на агрегатных станках-полуавтоматах после модифицирования к среднесерийному расходу для отливок из "нирезиста" с пластинчатой формой графита. Если отношение превышало 4,5, то ставилась оценка "неудовлетворительно", если в пределах от 1,5 до 2,5 – "отлично".

Как видно из табл. 2, наилучшие результаты по структуре, свойствам и количеству литейного брака получаются при использовании доменного чугуна Л5 (ОАО "КМЗ"), модифицированного лигатурой

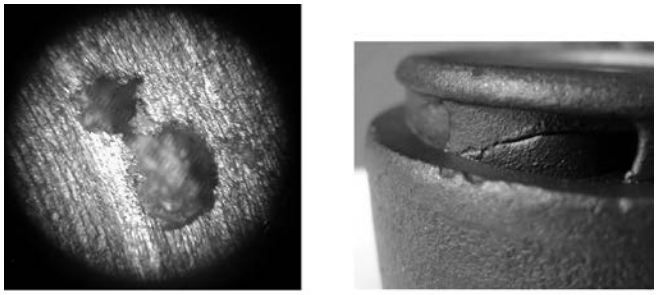
2. Результаты пилотных экспериментальных плавок

Марка чугуна (производитель)	Тип лигатуры	Количество лигатуры, кг/100 кг	Структура чугуна	Обрабатываемость	Механические свойства			Литейный брак, %
					$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ	
Л5 (ОАО "КМЗ")	ЖКМКБ (7 % Mg; 4 % Ba)	1,8	ШГф5, Ц2-4	Отличная	450	10	180	15
П2 (ОАО "НЛМК")	ЖКМК (7 % Mg)	1,6	ШГф4-5, ВГф2-3, Ц25	Неудовлетворительная	400	4	350	37
		2,0	ШГф4-5, Ц10-15	Удовлетворительная	450	5	250	32
		3,6	ШГф4-5, Ц10	Хорошая	330	6	220	35
Л5 (ОАО "ЛМЗ")	Ni–Mg (17 % Mg)	0,5	ШГф3-4, Ц40	Неудовлетворительная	600	2	370	32
		0,8	ШГф3-5, Ц40		450	4	280	25
		1,0	ШГф4-5, Ц25	Удовлетворительная	400	6	240	20

типа ЖКМКБ. Вероятная причина улучшения структуры и свойств ЧШГ заключается в нивелировании Ba и Mg действия наследственных микроэлементов-антиглобуляризаторов доменных чугунов (см. табл. 2): Ni, As, Al, Pb и особенно – Ti, большее количество которых обнаружено в чугунах ЛМЗ (0,048 %).

Структуры чугунов, модифицированных различными лигатурами, приведены на рис. 2.

Главное преимущество лигатуры Ni–Mg перед ЖКМК и ЖКМКБ (кроме практического отсутствия "пироэффекта" и большим усвоением Mg) в том, что при ее использовании в структуре не образуются участки с газоусадочной рыхлотой, однако возможно появление отдельных дефектов в зоне теплового узла отливки (см. рис. 2, *а*). Лигатура ЖКМКБ при прочих равных условиях дает более



а) *б)*

Рис. 1. Виды дефектов отливок из ЧШГ:
а – раковины, ×30; *б* – спай, ×0,5

стабильный по размерам и формам шаровидный графит, к тому же значительно сокращается количество зон с газоусадочными дефектами (см. рис. 2, *б*, *в*).

Количество лигатуры в большей степени определяется содержанием элементов-антиграфитизаторов, чем остаточным содержанием Mg. Например, в плавках при содержании 0,048...0,037 % антиграфитизаторов и остаточном содержании Mg на уровне 0,23...0,33 % не удалось получить стабильный шаровидный графит, и даже при ШГф33-4 и количестве до 12 % по площади шлифа структура оставалась аустенитно-ледебуритно-цементитной, что вызывало повышение прочности и твердости, но значительно снижало обрабатываемость, а в ряде случаев увеличивало и количество дефектов типа спай и раковины.

При использовании чугунов ОАО "КМЗ" и ОАО "НЛМК" с содержанием антиграфитизаторов 0,030...0,035 % образовывался шаровидный графит диаметром 25...180 мкм при остаточном содержании Mg от 0,025 до 0,05 % соответственно, количество S составляло 0,010...0,014 %.

Для более детального изучения структуры ЧШГ образцы после металлографического анализа были подвергнуты глубокому травлению в целях выделения включений графита и степени дисперсности матрицы. В частности с использованием методик СЗМ были исследованы раковины (кратеры) шаровидного графита правильной формы диаметром 4...6 мкм (рис. 3).

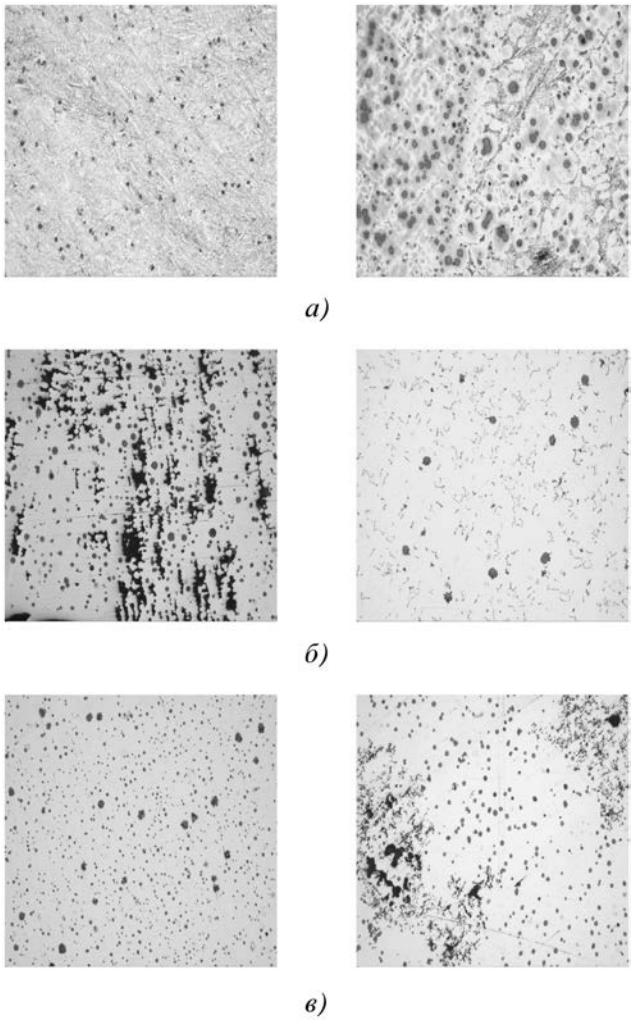


Рис. 2. Структуры при модифицировании ЧШГ различными лигатурами (×100, травление):
а – Ni–Mg; *б* – ЖКМК; *в* – ЖКМКБ

Установлен факт существенного отклонения строения внешней поверхности глобул графита от правильной шаровидной (эллипсоидной) формы, что требует дополнительных исследований (рис. 3, *а*). Модифицирование "нирезиста" лигатурами с Mg хорошо измельчает литую структуру аустенита: расстояние между пластинками в перпендикулярном срезе не превышает 1,0 мкм (см. рис. 3, *б*), тогда как в немодифицированном состоянии это значение может превышать 5,0 мкм.

Выводы

1. Для ковшового модифицирования "нирезиста" лучшего всего использовать лигатуру типа ЖКМКБ в количестве до 2,0 %, так как увеличение ее расхода приводит к возникновению дефектов раковина и увеличивается количество дефектов спай.

2. Для сложных тонкостенных отливок насосных агрегатов необходимо использовать доменные

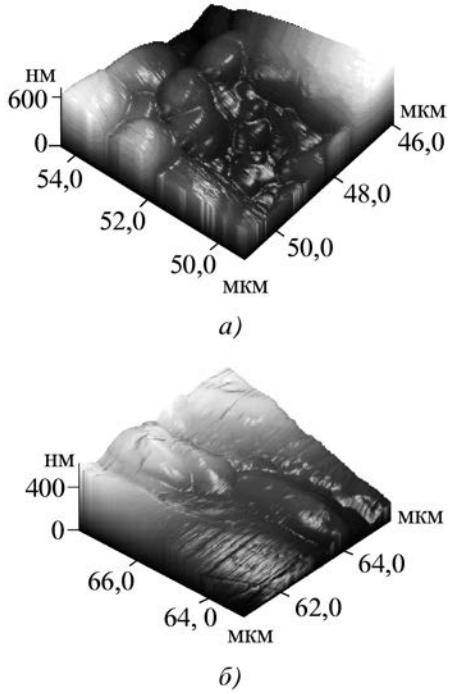


Рис. 3. Фотографии СЗМ структуры чугунов, модифицированных ЖКМКБ, после глубокого травления поверхности (×23438):
а – кратер шаровидного графита; *б* – морфология пластинчатого аустенита

чугуны с максимальным содержанием элементов-антиглобуляризаторов (особенно As, Al, Pb и Ti) не более 0,035 %.

3. Механические свойства "нирезиста" с шаровидным графитом при соблюдении условия хорошей обрабатываемости отливок соответствуют марке ВЧ 45.

4. Максимальный уровень литейного брака при выпуске отливок из высокопрочного "нирезиста" составляет 15...20 %.

5. Модифицирование лигатурами с Mg, помимо изменения формы графита, существенно увеличивает дисперсность легированного аустенита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шерман А.Д.** Чугун: справочник. М.: Металлургия, 1991. 576 с.

2. **Чернышов Е.А.** Литейные сплавы и их зарубежные аналоги: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 336 с.

3. **Рябчиков И.В.** Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов. М.: Эконст, 2008. 400 с.

Александр Николаевич Роготовский, канд. техн. наук;
Алексей Александрович Шипельников, инженер

УДК 621.787

А.П. Корневич, Б.И. Семёнов *(МГТУ им. Н.Э. Баумана),*
Я.В. Чуфринова, Г.В. Шилло *(ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, КБ "Салют")*

Особенности технологии сварки трением с перемешиванием

Представлены описание процесса сварки трением с перемешиванием (СТП), основное оборудование, наиболее распространенные области применения. Рассмотрены механизм образования сварного шва, оптимальные параметры режима сварки, основные преимущества и недостатки сварки в твердой фазе. Дан анализ структур и механических характеристик полученных швов на примере алюминиевых сплавов.

Description of the friction stir welding process, basic equipment, the most common fields of application is presented. Mechanism of formation weld, optimal parameters welding regime, main advantages and disadvantages of semisolid weldings are considered. Analysis of structures and mechanical properties of the achieved seams the examples of aluminum alloys is given.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; третье тело; пластическая деформация; сварка разнородных сплавов.

Keywords: friction stir welding; third body; plasticity; heterogeneous alloys welding.

На данном этапе развития авиационно-космической техники и других отраслей машиностроения вопрос соединения материалов в интегрированных деталях и сложных конструкциях относится к числу наиболее проблемных. Как показывает практика, одним из самых надежных и прогрессивных технологических методов получения неразъемного соединения деталей при создании современных конструкций с высокими эксплуатационными характеристиками является сварка. Преимущества сварных соединений способствуют широкому использованию их в изделиях различного назначения.

Технологический прогресс предъявляет все более высокие требования к надежности и точности сварных соединений. Одновременно возникает необходимость применения в сварных конструкциях материалов, разработанных на основе новых систем легирования или получаемых с использованием новых технологий. Поскольку такие материалы, обладая необходимым комплексом физико-механических характеристик, часто плохо свариваются методами сварки плавлением, особый интерес для их соединения представляют те способы сварки, в которых формирование шва происходит без образования жидкой прослойки расплавленного металла. Наиболее перспективным является метод сварки трением, в котором соединение деталей из однородных или разнородных материалов происходит за счет локализации выделения теплоты и интенсивной пластической деформации соединяемых материалов в зоне трибоконтакта, в результате чего и происходит формирование сварного шва.

Классические схемы данного вида сварки, реализуемые в виде торцевого трения двух заготовок, накладывают ограничения на геометрическую форму свариваемых деталей и, как следствие, снижают его технологические возможности. Поэтому для реализации процессов сварки в результате нагрева сухим трением были разработаны новые технологические схемы. Одним из таких способов является Friction Stir Welding (FSW) – сварка трением с перемешиванием (СТП).

Впервые сварка в процессе трения вращающегося стержня о заготовку была осуществлена в России Ю.В. Клименко и защищена авторским свидетельством 195846 (СССР) с приоритетом от 09.11.1965 г. Однако этот способ не получил дальнейшего развития в России.

Началом активного исследования данного способа явились разработка и патентование в 1992 г. В. Томасом из института сварки TWI (Кембридж, Великобритания) усовершенствованного способа сварки трением с перемешиванием. В середине 1990-х гг. шведской фирмой ESAB освоено изготовление установок для СТП, которые были поставлены в десять промышленно развитых стран мира. Первоначально установки были использованы для изготовления нефтедобывающих платформ, а затем нашли широкое применение в авто-, судо-, вагоностроении и других отраслях промышленности.

Несмотря на то, что этот способ является довольно молодым, за рубежом он уже занял одно из ведущих мест при сварке различных деталей в космической и авиационной технике. Первым изделием, в производстве которого использовали СТП,

были сотовые панели холодильной установки для быстрого замораживания рыбы на рыболовецких судах [1].

Фирма Boeing (США), которая также находится среди первых компаний, реализующих преимущества процесса, применяет СТП для производства ракет серии Delta. Переход с аргонодуговой сварки на СТП при изготовлении топливных баков ракет позволил снизить почти в 2 раза стоимость сварки и улучшил качество швов. За первые четыре года было выполнено свыше 2,5 км бездефектных швов при СТП панелей из алюминиевого сплава 2014. В настоящее время фирма Boeing производит с использованием СТП топливные баки ракеты Delta IV диаметром более 5 м.

Эта же фирма применяет СТП при изготовлении самолетных конструкций. Криволинейные соединения створок шасси самолета из сплава 7075 сваривают внахлест. При этом используется запатентованный силовой привод с адаптивной системой регулирования глубины погружения инструмента по действующей на него силе [2].

Авиационная компания Airbus GmbH (DA) и аэрокосмическое агентство проявили интерес к процессу СТП благодаря преимуществу в таких показателях, как масса конструкции, прочность соединения (особенно усталостная) и стоимость. Рассматривался вопрос о применении СТП для выполнения соединений в конструкции планера, включая фюзеляж, пассажирские кабины, вертикальные стабилизаторы, крылья, и окончательной сборки узкофюзеляжных самолетов [2]. Для конструкции самолетов серии A3xxx Airbus (рис. 1) разрабатываются процессы СТП главным образом продольных стыковых швов фюзеляжа, крыльев, центрального кессона крыла.

Авиационная компания Eclipce Aviation применяет СТП в производстве пятиместного самолета бизнес-класса Eclipse 500. Концепция конструкции

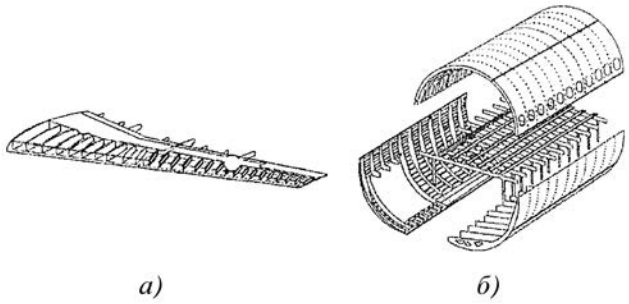


Рис. 1. Элементы крыла (*а*) и панели фюзеляжа (*б*) самолета AIRBUS 380, соединяемые СТП

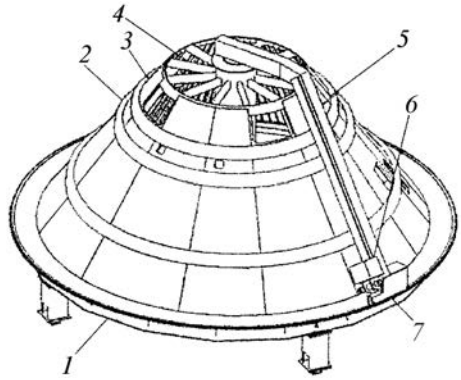


Рис. 2. Схема кондуктора для сборки под СТП носовой части корпуса двигателя "Ariane 5":
1 – нижняя опора; *2* – кольцевые рамы; *3* – соединяемые панели; *4* – верхняя опора; *5* – опорная балка для СТП; *6, 7* – тележки для осевого и радиального перемещения при СТП

крыла самолета при изготовлении жестких стрингерных панелей основывается на возможностях СТП деталей из алюминиевых сплавов в одноименном и разноименном сочетаниях. Очень важна возможность проведения ремонта повторным использованием СТП. Для реализации процесса СТП компания Eclipse Aviation построила специальный производственный центр, обеспечивающий производство 1500 самолетов в год.

Компания Fokker Space разработала корпус двигателя главной криогенной ступени пусковой установки "Ariane 5", конструкция которой модернизирована под нахлесточное соединение панелей СТП (вместо болтового соединения) в специально разработанном кондукторе (рис. 2). Исследования и испытания соединений СТП показали их значительное преимущество перед болтовыми и заклепочными соединениями: повышаются прочность и жесткость конструкции, снижаются масса двигателя и стоимость его изготовления.

Одна из основных областей применения технологии СТП – судостроение. Возможно применение СТП в различных морских объектах: катера-катамараны, нефтедобывающие платформы, рефрижераторы, посадочные платформы для вертолетов, мачты, например, парусных яхт и др. [1].

Успешно применяется технология СТП в производстве подвижного состава железнодорожного транспорта. Больших успехов в освоении СТП алюминиевых конструкций для подвижного состава железных дорог достигло вагоностроение в Японии. Широко применяют крупногабаритные полые панели. Панели, выполненные СТП, используются для пола суперэкспресса Shinkansen. Большие кри-

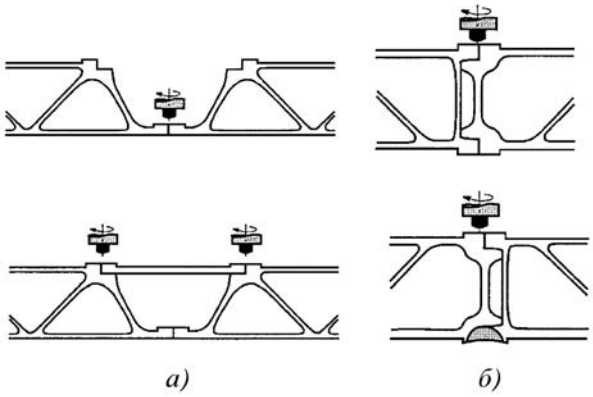


Рис. 3. Стыки полых панелей вагонов двух серий (Hitachi):
а – суперэкспресс Shinkansen; *б* – TEC 700 Shinkansen

волинейные панели, сваренные СТП с лицевой и противоположной сторон, используются также и для стен вагона (рис. 3, *а*).

При пробеге около 450 тыс. км суперэкспресса TEC 700 Shinkansen (см. рис. 3, *б*) со скоростью до 285 км/ч разрушений не возникло, снизились вибрация и шум.

Процесс СТП позволяет производить сварку в любом пространственном положении, что обеспечивает возможность соединения этим методом кольцевых стыков неповоротных труб и других цилиндрических деталей. Рис. 4 иллюстрирует концепцию орбитальной сварки кольцевого стыка неповоротных цилиндров с внутренней стороны одной или несколькими сварочными головками. Технология орбитальной СТП разработана для соединения алюминиевых труб при монтаже газопровода [2].

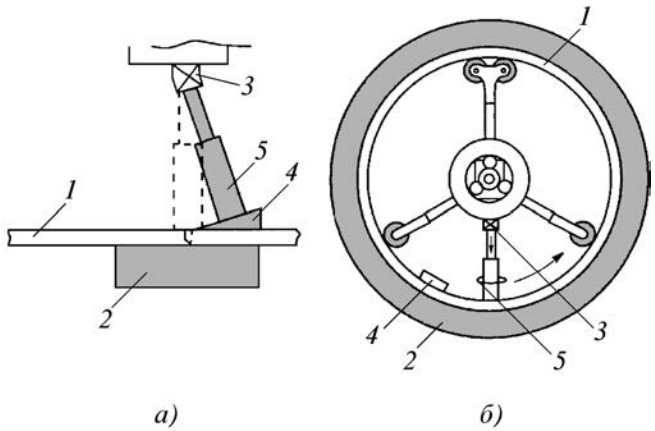


Рис. 4. Схема СТП кольцевого соединения трубы:
а, б – вид сбоку и вдоль оси трубы;
1 – труба; *2* – опорное кольцо; *3* – шарнирное соединение; *4* – неостающаяся клиновидная пластина для окончания сварки без кратера; *5* – сварочная головка

СТП применяется также в строительстве для изготовления жестких крупных панелей стен, фасадов и других компонентов сооружений. Отмечается особенно высокая технико-экономическая эффективность использования процесса СТП в мостостроении. Перечисленными объектами промышленное применение процесса СТП не ограничивается, выделены лишь наиболее крупные из них.

Несмотря на положительные результаты, достигнутые в ходе многочисленных исследований и разработок, применение СТП для ответственных конструкций, контролируемое соответствующими департаментами (например, в аэрокосмической отрасли США – NASA), потребовало разработки стандартов и спецификаций. В настоящее время Международная организация по стандартизации (ISO) совместно с институтами разрабатывает стандарт ISO/AWI – 25239 по сварке трением с перемешиванием алюминия и алюминиевых сплавов. Стандарт включает в себя пять частей: общие положения; содержание; проектирование сварных соединений; квалификация операторов-сварщиков; техническое описание и ограничения в процессе сварки; качество и требования по контролю.

Таким образом, разработка и применение СТП в последние пять-шесть лет быстро развивались практически во всех промышленно развитых странах. Об этом можно судить по постоянному росту числа сообщений на международных симпозиумах, по результатам исследований, разработок и производственного внедрения процесса СТП. Уже в 2000 г. на конференции в Вашингтоне (США) по вопросам СТП было заслушано около 50 специалистов из 12 штатов США, большинство из которых были представителями промышленных компаний. Такое интенсивное развитие технологии СТП и ее коммерциализация, по-видимому, изменят в глобальной перспективе количественное соотношение в методах сварки, используемых в промышленном производстве и строительстве.

В последние годы увеличилось число публикаций [1–4] о результатах разработок и исследований процесса СТП разных типов соединений – нахлесточных, угловых, тавровых. Указывается, что при СТП тавровых и угловых соединений не обеспечено формирование галтелей с плавным сопряжением поверхностей элементов профиля. Такое соединение имеет небольшой ресурс при циклических нагрузках и создает благоприятные условия для развития коррозии.

Большое внимание уделяется исследованию особенностей процесса сварки, в том числе при

осуществлении нахлесточных соединений, что связано с востребованностью последних для многих изделий.

Растет число публикаций по исследованию процесса СТП материалов с более высокой, чем у алюминиевых сплавов, температурой перехода в пластическое состояние, например, сплавов магния, меди и медных сплавов, титановых сплавов и сталей. Отмечается, что до практической реализации процесса СТП в производстве ответственных титановых и стальных конструкций должны быть проведены дополнительные исследования и разработки по совершенствованию инструмента, оборудования и технологического процесса в целях получения устойчивых результатов по формированию соединения и его рабочим характеристикам.

Сложные сварные конструкции могут содержать соединения разноименных и разнородных материалов. Судя по публикациям, процесс СТП разноименных алюминиевых сплавов вызывает большой интерес и широко исследуется. Отработаны технологии и установлены прочностные характеристики соединений алюминиевых сплавов разных групп легирования в разноименном сочетании, превосходящие аналогичные при сварке плавлением и вполне приемлемые для практического использования в конструкциях изделий ответственного назначения.

В значительно меньшей степени готов к промышленному применению процесс СТП разнородных материалов (с большим различием термомеханических характеристик). Имеются сведения об исследованиях процесса СТП соединений разнородных материалов, например, в сочетаниях алюминиевый сплав с магниевым сплавом, медным сплавом и сталью. Получены некоторые представления об особенностях процесса, сформулированы требования к ориентации инструмента и направлению перемещения инструмента относительно линии стыка, определена область оптимальных частот вращения инструмента и другие параметры.

На базе метода СТП развиваются и активно изучаются методы перемешивающей обработки локальных участков сложных фасонных изделий (отливок и сварных конструкций, включая обработку сварных швов, произведенных традиционными методами) для принципиального изменения микроструктуры и свойств обрабатываемых участков деталей. В открытой печати появились публикации по эффективному использованию метода СТП для получения объемных наноструктурированных материалов.

В последние пять лет основными видами неразрушающего контроля соединений, полученных СТП, остаются визуальный (оптический) контроль и УЗК, в том числе автоматический (аппаратура УЗК встраивается в установку). Следует отметить попытку использовать в качестве неразрушающего метода контроля акустическую эмиссию. Этим методом можно получать полезную информацию о дефектах в шве, поскольку дефекты разных типов дают разные сигналы, которые по-разному отражаются на частотных диаграммах [3, 4].

Таким образом, из анализа публикаций следует, что можно считать практически освоенным процесс СТП алюминиевых сплавов в одноименном и разноименном сочетаниях.

Алюминиевые сплавы получили наиболее широкое распространение среди всех материалов, применяемых в авиационной и космической промышленности. Первые эксперименты СТП, проведенные на алюминиевых сплавах системы Al–Mg–Si, показали высокие свойства получаемых соединений. Дальнейшее развитие данного способа сварки позволило сваривать алюминиевые сплавы систем Al–Cu, Al–Mg, Al–Zn–Mg–Cu, Al–Li. Например, компания Boeing, использующая этот способ сварки при изготовлении топливного бака из алюминиевого сплава для ракеты Delta IV, заявляет, что полученные таким образом соединения имеют более высокую прочность (на 30..50 %), чем при использовании для этих целей традиционной дуговой сварки в среде защитных газов. NASA применяет технологии СТП для получения продольных и кольцевых швов при производстве топливного бака LH2 (рис. 5) экспериментального самолета X33 [5].

Известно множество различных способов сварки, которые могут применяться для изготовления изделий из алюминиевых сплавов. Это газовая сварка, точечная и шовная сварка, электронно-лучевая, различные виды дуговой электрической сварки и сварка трением. В сравнении с жидкофазной сваркой алюминиевых сплавов твердофазная сварка обладает следующими металлургическими преимуществами:

1. Соединение в твердой фазе исключает образование растрескиваний, всегда сопровождающих жидкофазные процессы, т.е. отсутствуют кристаллизационные горячие трещины.

2. Не происходит потери элементов сплавляемых материалов из-за испарения, что обеспечивает постоянство химического состава сплава.

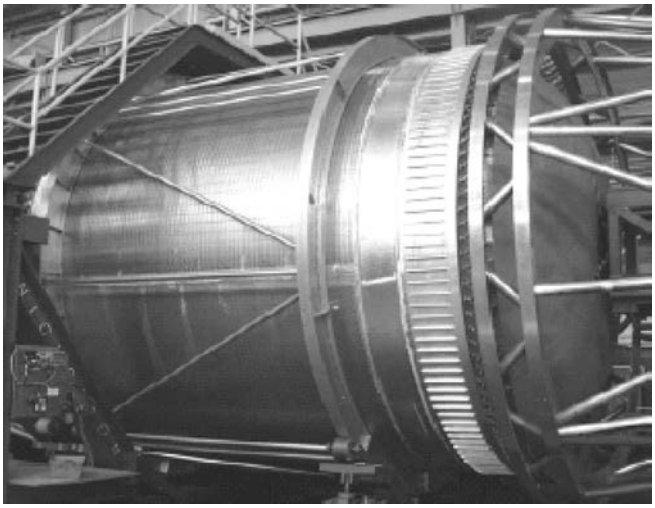


Рис. 5. Топливный бак LH2 для самолета X33

3. Разрушающее (износ и дробление), перемешивающее и сжимающее действие сварочного инструмента создает в обрабатываемом металле более мелкозернистую структуру, чем та, которую имеет исходный материал.

Данный метод является выгодным с точки зрения экономической эффективности благодаря отсутствию большого количества вспомогательных материалов (сварочной проволоки, аргона, вольфрамового электрода и др.). Метод СТП является экологически более чистым по сравнению с другими, потому что отсутствуют всевозможные выбросы в атмосферу, нет контакта рабочего с искусственной газовой средой.

Установки для СТП. Передовой производитель сварочного оборудования – концерн ESAB – включил в свою производственную программу выпуск установок для СТП. Программа Super Stir™ содержит несколько типов установок, разработанных на базе стандартной установки, позволяющих сваривать изделия размерами от 0,5×1,5 до 10×20 м. Разные модели этих установок имеют консольную или портальную конструкцию. Установки полностью автоматизированные, с одинаковым принципом действия, смонтированы на мощной раме, рассчитанной на большие нагрузки. Сварочные головки перемещаются по сверхпрочной станине от системы реечного привода. Концерн ESAB совместно с исследовательским центром разработал серию установок, которые применяются в космической, авиастроительной, судостроительной, автомобилестроительной, энергетической и других отраслях промышленности [2].

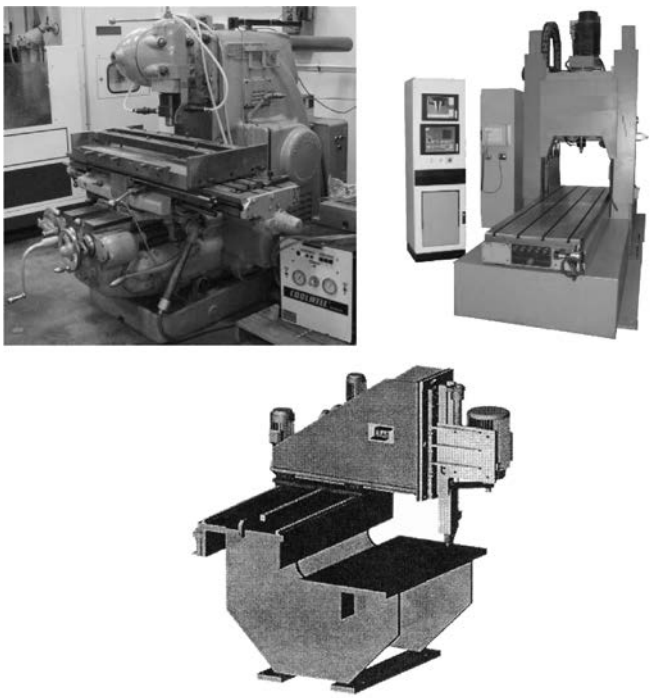


Рис. 6. Экспериментальное оборудование и модульные установки серии Super Stir™ и LEGIO™ "FSW 3 UT"

Фирма ESAB предлагает новую серию установок LEGIO™ для сварки (рис. 6), позволяющих сократить затраты на приобретение и время на производственное освоение. Установки LEGIO™ представляют стандартизированную модульную систему, способную решать технологические задачи сварки изделий в большом диапазоне толщин.

Установки серии LEGIO™ поставляются двух видов: напольная с вертикальной стойкой для сварки кольцевых швов и с низко расположенными шпиндельными головками для двусторонней сварки.

На ранней стадии освоения процесса СТП (в 1990-х гг.) практически только фирма ESAB производила специализированные установки для этого процесса и поставляла их по всему миру.

В настоящее время большое число фирм в разных странах производят оборудование для СТП. Британский институт сварки (TWI) разработал серию машин типа FW для СТП. В Галифаксе (Великобритания) компания Crawford Swif изготовила трехкоординатную установку Power Stir™-360, рассчитанную на силу 100 кН. Эта установка предназначалась для СТП экспериментальных конструкций крыльев и обшивки фюзеляжа больших самолетов, в частности AIRBUS A3xxx и других самолетов [2].

Американская фирма NOVA-TECH Engineering производит промышленные и экспериментальные

установки типа H10K (горизонтальные) и C10K (вертикальные) для СТП кольцевых и продольных соединений емкостей. Фирма MTS System Co. (США) в сотрудничестве с другими компаниями получила несколько патентов на конструкцию сварочной головки и инструментов, а также разработала систему управления положением инструмента относительно нормали к поверхности стыка.

В последние годы расширяется разработка и применение СТП в КНР. Создан специализированный Центр СТП, которым в течение двух лет изготовлены и поставлены заказчикам 16 установок разных типов.

Большое число фирм, изготовляющих оборудование для процесса СТП, создали материально-техническую основу для углубленного изучения и расширения области его применения в разных отраслях промышленности.

Преимущества фрикционной сварки перед существующими технологиями. При разработке и исследовании новых методов обработки материалов учитывают все положительные и отрицательные стороны этих методов. Важным условием удачного внедрения и дальнейшего развития новых технологий является преимущество их перед уже существующими технологиями.

Снижение производственных затрат. Сварочная операция проста, энергетически эффективна и исключает необходимость в финансовых вложениях:

– простое кнопочное электромеханическое устройство энергетически эффективно: единичный проход при образовании шва глубиной 12,5 мм в сплаве 6ххх осуществляется с затратой не более 3 кВт мощности, требует очень небольшого ухода и за исключением сварного инструмента и электроэнергии не требует других затрат;

– процесс сварки не требует электродной проволоки (наполнителя) и газа для защиты сварочной ванны;

– нет необходимости в удалении оксидов непосредственно перед осуществлением сварки;

– метод идеально подходит для автоматизации и мониторинга;

– если необходимо, все сварные операции можно осуществлять в любом пространственном положении.

Качество сварки открывает *возможности для создания улучшенных и новых конструкций*. Малое коробление при повторяемости качества твердофазной сварки позволяет совершенствовать существующие изделия и создать новые. Например, в случае алюминиевых сплавов:

– может быть осуществлена сварка сплавов, которые не сваривают жидкофазными методами из-за чувствительности к растрескиванию;

– в термообрабатываемых сплавах может быть достигнута высокая прочность стыка;

– отсутствует пористость;

– твердофазная сварка открывает возможность для сохранения физико-химических свойств у сплавов, таких как металломатричные композиты или материалы, полученные методами быстрого затвердевания, в которых сварка плавлением приводит к нежелательным химическим реакциям;

– могут быть соединены материалы, полученные в различных условиях, т.е. отливка с прессованным (экструдированным) полуфабрикатом, отливка с деформированной деталью и т.п.;

– экструдируемые легкие панели, которые трудно получать длинномерными или сваривать плавлением из-за местного коробления, могут быть сварены методом СТП для получения больших конструкций, таких как внутренние перегородки для кораблей, шасси и платформы для железнодорожного или тяжелого автомобильного транспорта;

– трудные для изготовления полые отливки, такие как трубопроводы, могут быть более легко изготовлены СТП из двух литых половинок или экструдированных заготовок.

Гарантия качества изделий. Процесс полностью механизирован, поэтому сварочные операции и подвод энергии для сварки осуществляется аккуратно, в контролируемых условиях:

– качество сварки определяется формой профиля сварочного инструмента и заранее запланированными механическими перемещениями машины и поэтому возможен простой контроль в реальном времени для остановки сварочной операции, если действия машины будут отличаться от регламентированных;

– поскольку сварные операции – это механические действия, контролируемые извне, могут быть подготовлены и использованы индивидуальные команды, если необходимо иметь информацию о каждом сварном шве;

– подготовленные к сварке соединяемые поверхности не обязательно перед сваркой плотно прижимать друг к другу. Щель может изменяться, например от 0,2 мм при сварке пластин толщиной 1,6 мм до 1,25 мм для пластин толщиной 12,7 мм.

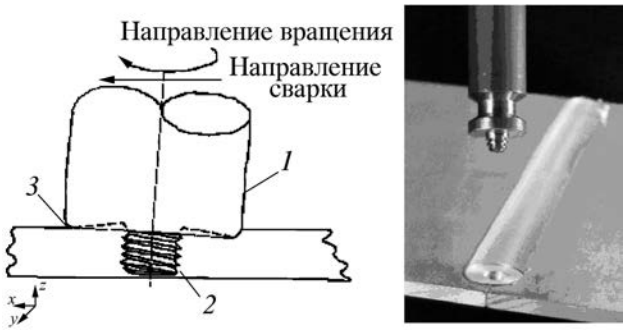


Рис. 7. Схематическое изображение и практическое осуществление процесса СТП:
1 – корпус; *2* – рабочий стержень; *3* – опорный бурт

Безопасность. Сварочная операция требует только обычной обрезной машины (типа фрезерного станка). Процесс чистый и не создает каких-либо других рисков, таких как испарение при сварке (дым) или радиация.

Особенности СТП и параметры процесса. Для осуществления сварки заготовки прижимают друг к другу поперечной силой F_y, затем в зону соединения заготовок вводят вращающийся инструмент, состоящий из заплечника (опоры) и рабочего стержня (штифта, индентора). В процессе сухого трения рабочий стержень под действием осевой силы F_z углубляется в материал заготовок чаще всего так, что опора (рис. 7) оказывается только частично погруженной в металл и не касается поверхностей заготовок своей передней частью. На этой и последующей стадиях процесса особенно важно предельно нагреть заготовки в зоне формируемого соединения, не допустив оплавления металла, т.е. чтобы не реализовалась сварка плавлением.

После термической стабилизации сложного трибоконтакта включается перемещение инструмента под действием силы F_x и начинается формирование сварного шва.

Основные параметры процесса СТП – скорость сварки (скорость перемещения инструмента, подача); частота вращения инструмента; угол наклона инструмента, его размеры и глубина погружения. Производные величины – сила прижатия инструмента F_z, сила перемещения F_x и температурное поле трибоконтакта.

В работе [6] было изучено влияние различных комбинаций величин основных параметров на изменение температур и сил при обработке сплава

1. Уровни основных варьируемых параметров

Параметр	L	M	H
Частота вращения, мин $^{-1}$	200	350	500
Подача, мм/мин	51	178	305
Глубина погружения центральной точки опоры, мм	0,24	0,09	–0,06

7075. Использованные уровни основных параметров сварки встык пластин толщиной 9,5 мм приведены в табл. 1, а влияние различных сочетаний этих параметров на производные величины представлено на рис. 8 и 9.

Процесс СТП основан на интенсивном совместном деформировании пластифицированной зоны соединяемых заготовок. Реализация процесса на практике затруднена его недостаточной изученностью. К числу слабо изученных особенностей следует отнести следующие:

– отсутствие понятия "износ" применительно к реализуемой паре сухого трения;

– отсутствие установленных зависимостей коэффициента сухого трения и износа от выбираемого сочетания материалов пары инструмент–заготовка и температуры нагрева в зоне контакта;

– недостаток информации о "третьем теле" как обязательном продукте взаимодействия материала заготовки с материалом инструмента при сухом трении, о характере перемещения этого продукта и пластифицированного материала в окрестности инструмента, а также и о необходимых для этого условиях;

– недостаток информации о влиянии геометрической формы инструмента, термической обработки и других факторов на формирование микро- и макроструктуры зоны соединения;

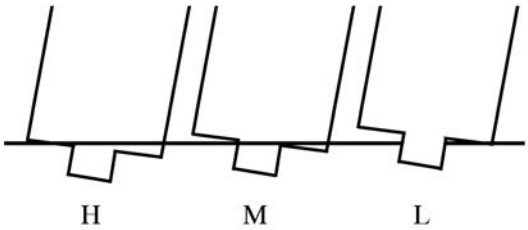


Рис. 8. Схемы погружения опоры инструмента в обрабатываемый материал и использованные обозначения

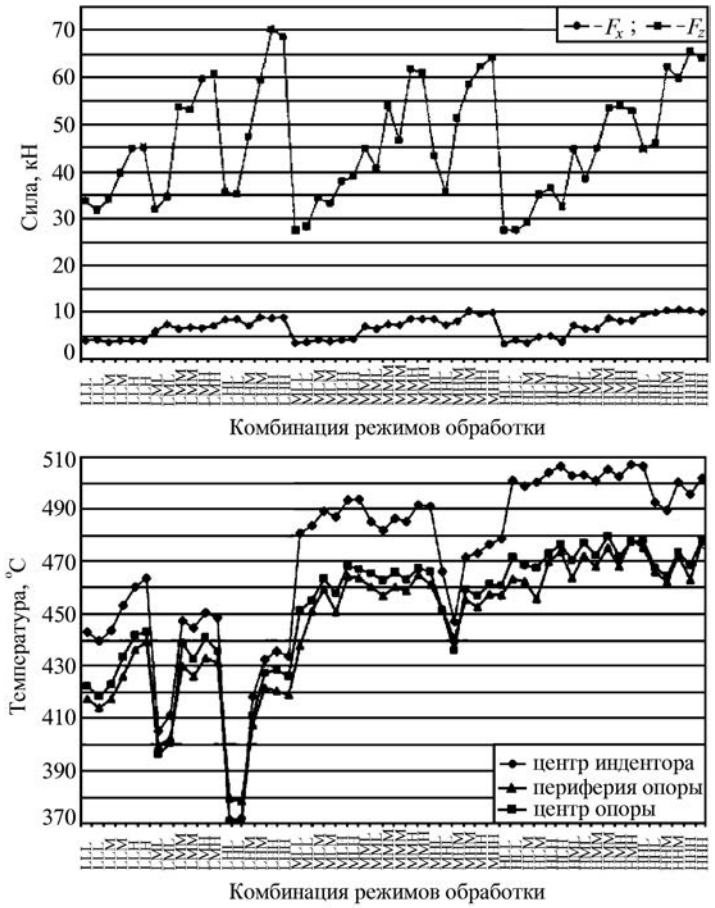


Рис. 9. Влияние различных комбинаций режимов обработки на силы и температуру в зоне перемешивания [6]

– недостаток информации об уровнях и картине распределения остаточных напряжений в сварном соединении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Штрикман М.М.** Новый способ сварки трением и перспективы его применения (обзор) // Сварочное производство. 2001. № 11. С. 36–41.

2. **Штрикман М.М.** Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (обзор) // Сварочное производство. 2007. № 9. С. 35–40. № 10. С. 25–32. № 11. С. 36–45.

3. **Фрикционная сварка** листовых конструкций из алюминиевых сплавов 1201 и АМг6 / М.М. Штрикман, В.А. Половцев, Г.В. Шилло, Н.В. Макаров, А.Н. Сабанцев // Сварочное производство. 2004. № 4. С. 41–47.

4. **Служебные характеристики** соединений алюминиевых сплавов 1201 и АМг6, выполненных фрикционной сваркой / В.А. Половцев, М.М. Штрикман, Г.В. Шилло, Н.В. Макаров, Н.С. Барабохин, В.Э. Силис, П.В. Загреев // Сварочное производство. 2005. № 12. С. 8–14.

5. **Обзор** иностранных публикаций. FSW – Materials and thicknesses (http://www.twi.co.uk/j32k/ getFile/ fswmat.html)

6. **Covington J.L.** Experimental and numerical investigation of tool heating during friction stir welding: thesis submitted to the faculty of Brigham Young University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. December 2005.

Артем Павлович Корневич, инженер;
Борис Иванович Семёнов, д-р техн. наук;
Яна Владимировна Чуфринова, инженер-технолог;
Геннадий Васильевич Шилло, начальник группы

(Продолжение следует.)

Уважаемые читатели!

Ïðîäîëæàåòñÿ ïîäïèñêà

íà íàó÷íî-òåõíè÷åñêèé è ïðîçâîäñòâåííûé æóðíàë

"Заготовительные производства в машиностроении"

Ïîäïèñíûå èíäåêñû ïî êàòàëîãàì :

"Ðîñïå÷àòü" – **81580**; "Ïðåññà Ðîññèè" – **39205**; "Ïî÷òà Ðîññèè" – **60261**

Ïîäïèñêó íà æóðíàë ìîæíî îôîðìèòü ñ ëþáîãî íîìåðà â ëþáîì îòäåëåíèè ñâÿçè èëè íåïîñðåäñòâåííî â ÎÎÎ "Èçäàòåëüñòâî Ìàøèíîñòðîåíèå".

Ïðèåì çàêàçîâ íà ïîäïèñêó:

Òåë.: (499) 269-66-00, ôàêñ: (499) 269-48-97

E-mail: zpm@mashin.ru, realiz@mashin.ru

УДК 621.791.754.29

М.А. Гуреева, В.В. Овчинников, С.И. Феклистов, В.И. Рязанцев, С.В. Данилкин *(ОАО НПО "Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения", Московский государственный индустриальный университет, ОАО "Национальный институт авиационной технологии")*

Технологические особенности аргонодуговой сварки жаропрочных алюминиевых сплавов

Приведены результаты исследований прочностных свойств сварных соединений современных жаропрочных алюминиевых сплавов, выполненных автоматической и ручной агронодуговой сваркой.

The results of studies of the strength properties of the welded joints of the contemporary high-temperature (strength) aluminum alloys, executed by automatic and manual argon-arc welding, are given.

Ключевые слова: жаропрочные свариваемые алюминиевые сплавы; спеченные алюминиевые сплавы; склонность к образованию горячих трещин; крестовая проба; круговая проба; критическая скорость деформации; аргонодуговая сварка; механические свойства сварных соединений; многопроходная сварка.

Keywords: the high-temperature (strength) welded aluminum alloys; the sintered aluminum alloys; tendency toward the formation of hot cracks; cross test; circular test; the critical speed of deformation; argon-arc welding; mechanical properties of welded joints; multipass welding.

В России наибольшее распространение в качестве конструкционного материала системы Al–Mg для сварных изделий получил термически неупрочняемый сплав средней прочности АМг6.

Однако развитие новой техники предъявляет ряд требований к жаропрочным материалам, главным из которых является повышение прочностных характеристик основного металла и сварных соединений в интервале температур 200...400 °С (а в некоторых случаях выше) при свариваемости и коррозионной стойкости не ниже, чем у сплава АМг6.

Решению этой проблемы посвящены многие научные исследования, как в нашей стране, так и за рубежом. В частности, наибольшее внимание уделялось разработке жаропрочных свариваемых сплавов на основе систем Al–Cu и Al–Cu–Mn с применением небольшого количества легирующих добавок (Ti, Zr, V и Cd). К сплавам этого типа относят Д20, Д21, 1201 и 1205. По сравнению со сплавами системы Al–Mg жаропрочность основного материала и сварного соединения (табл. 1) этих сплавов повысилась до 200 °С [1, 2]. Однако отдельные части конструкций, изготовляемых из свариваемых материалов, часто работают при более высоких температурах. В подобных случаях вынуждены применять титановые сплавы и коррозионно-стойкие стали, что значительно увеличивает массу конструкции.

С учетом результатов работ по теории жаропрочности алюминиевых сплавов А.А. Бочвара детально

1. Химический состав исследуемых сплавов

Марка сплава	Содержание легирующих элементов, % мас.						
	Cu	Mg	Mn	Ti	V	Be	Fe
1201	5,8...6,8	0,01...0,02	0,2...0,4	0,02...0,1	0,05...0,15	–	≤ 0,30
1205	5,8...6,8	0,01...0,02	0,3...0,8	0,02...0,1	0,1...0,2 Cd	–	≤ 0,30
М40	6,0...7,0	0,25...0,45	0,4...0,8	0,1...0,2	–	–	≤ 0,15...0,25
1150	5,0...5,8	1,9...2,4	0,4...0,6	0,08...0,1	–	0,002...0,004	≤ 0,15...0,25
1151	5,0...5,8	1,9...2,4	0,4...0,55	0,08...0,12	0,05...0,1	0,002...0,004	≤ 0,15...0,25
1177	4,7...5,6	3,2...4,1	0,32...0,5	0,08...0,15	–	0,0008...0,03	≤ 0,16...0,28

Примечание. Во всех сплавах основа – алюминий; ≤ 0,07 % Si; прочие примеси ≤ 0,5 %.

2. Механические свойства основного металла при различных температурах

Марка сплава	Предел прочности $\sigma_в$, МПа / относительное удлинение δ, %, основного металла при температуре, °С								
	20	150	200	250	300	350	400	450	475
1201	430/8	335/12	270/13	200/18	–	–	–	–	–
М40	403/11	365/12	325/13	240/14	155/23	110/88	46/97	–	–
1205	442/12	340/13	284/14	215/14	155/25	–	–	–	–
1150	451/18,0	390/18,5	359/22	287/25	189/27	158/30	56/39	42/58	14/73
1151	453/17,5	395/18	364/21	296/23	206/24	173/26	68/36	47/54	17/69
1177	405/14	367/15	330/16	280/17	185/20	130/27	58/42	40/55	–

исследованы сплавы системы Al–Cu–Mg (Чирков Е.Ф. Жаропрочный сплав М40 // Промышленные, деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы. М., 1972. С. 123). По результатам этих исследований разработаны сплавы М40, 1150, 1151 и 1153 (см. табл. 1). Механические свойства сплавов приведены в табл. 2.

В данной работе исследовали свариваемость алюминиевых жаропрочных сплавов М40, 1150 и 1151 по сравнению со сплавами АМг6 и 1201 (прессованный и спеченный): листовые образцы толщиной 2 и 7 мм из сплавов 1150 и 1151 (в состоянии закалки и естественного старения) и из сплава М40 (в состоянии закалки и искусственного старения). Применяли автоматическую и ручную аргонодуговую сварку переменным синусоидальным током с питанием от источника ИСВУ-315. При сварке сплавов М40, 1150 и 1151 использовали присадочную проволоку Св1177.

Склонность к образованию горячих трещин при сварке определяли по крестовой пробе, пробам МВТУ и круговой.

Показатели горячеломкости исследованных сплавов приведены в табл. 3. Видно, что коэффициент трещинообразования по крестовой пробе для сплавов М40, 1150 и 1151 в 2,5–3 раза выше, чем для сплава АМг6 и находится на уровне сплава 1201. Минимальный диаметр круговой пробы без горячих трещин для сплавов М40, 1150 и 1151 в 2 раза больше, чем для сплава АМг6 и в 1,35 раза больше, чем для сплава 1201.

Критическая скорость деформации по пробе МВТУ для сплавов М40, 1150 и 1151 на 20...25 % меньше, чем для сплава АМг6 и находится на уровне сплава 1201.

Анализируя показатели склонности к образованию горячих трещин по трем использованным известным пробам, установили, что сплавы М40, 1150 и 1151 имеют заметно большую склонность к образованию горячих трещин, чем сплав АМг6, что соответствует уровню сплава 1201.

Механические свойства сварных соединений толщиной 2 мм приведены в табл. 4. Предел прочности сварных соединений при автоматической

3. Склонность к трещинообразованию сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов

Сплав	Присадочная проволока	Коэффициент трещинообразования по крестовой пробе, %	Критическая скорость деформации, мм/мин	Минимальный диаметр круговой пробы без трещин, мм
М40	Св1177	$\frac{9...16}{12}$	4,0	40
1150	Св1177	$\frac{6...14}{10}$	4,5	40
1151	Св1177	$\frac{5...14}{9,6}$	4,5	40
1201	Св1201	$\frac{5...16}{9,6}$	4,9	30
АМг6	СвАМг63	$\frac{2...8}{4}$	5,5	20

4. Механические свойства основного металла и сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов

Сплав	Тип образца	Предел прочности, МПа, образца		Угол изгиба, °	Ударная вязкость *KC*U, Дж/см^2		
		с выпуклостью и проплавом	без выпуклости и проплава		Шов	Линия сплавления	ЗТВ
М40	Основной металл	390...410 / 403		45...49 / 47	12...14 / 13		
	Сварное соединение (автоматическая сварка)	332...354 / 343	307...320 / 316	26...39 / 32	4...6,2 / 5,1	1,9...2,3 / 2,1	7,8...9,7 / 8,8
	Сварное соединение (ручная сварка)	280...301 / 292	271...302 / 283	20...30 / 25	3,2...5,9 / 4,9	1,7...2,2 / 1,95	7,6...9,8 / 8,5
1150	Основной металл	440...460 / 451		40...46 / 42	15...18 / 17		
	Сварное соединение (автоматическая сварка)	368...384 / 373	344...352 / 350	20...32 / 26	4,2...6,4 / 5,0	2,9...4,2 / 3,7	7,2...9,5 / 8,6
	Сварное соединение (ручная сварка)	305...350 / 334	290...332 / 322	18...21 / 20	3,3...4,0 / 3,8	1,7...2,5 / 2,2	7,7...9,8 / 8,7
1151	Основной металл	450...465 / 453		48...60 / 52	12...20 / 15		
	Сварное соединение (автоматическая сварка)	375...398 / 385	342...374 / 363	26...36 / 30	4,1...7,2 / 6,5	2,5...4,8 / 3,3	9,3...10,2 / 9,8
	Сварное соединение (ручная сварка)	310...352 / 338	304...348 / 333	17...22 / 20	3,6...5,4 / 4,0	2,1...3,1 / 2,3	8,2...9,9 / 8,9

сварке на оптимальных режимах для сплавов М40, 1150 и 1151 равен соответственно 0,85; 0,83 и 0,85 от предела прочности основного металла, а при ручной сварке – 0,72; 0,74 и 0,75.

Для сравнения отношение пределов прочности сварных соединений и основного металла для сплава АМг6 при той же толщине и автоматической сварке равно 0,92...0,95, а при ручной сварке – 0,86...0,88, т.е. значительно выше.

По абсолютному значению предела прочности сварного соединения сплав М40 аналогичен сплаву АМг6 как при автоматической, так и при ручной сварке. Прочность соединений из сплавов 1150 и 1151 при автоматической сварке на 50...60 МПа, а при ручной на 20...30 МПа выше, чем у сварных соединений из сплава АМг6. Предел прочности сварных соединений из алюминиевых сплавов 1420, 1421 и 1423 близок аналогичным показателям соединений из сплавов 1150 и 1151.

Угол изгиба сварных соединений из сплавов М40, 1150 и 1151 при автоматической сварке составляет всего 55...68 %, а при ручной – 45...50 % от угла изгиба основного металла. По абсолютному значению угол изгиба сварных соединений из сплавов М40, 1150 и 1151 в 3–5 раз меньше, чем у аналогичных образцов из сплава АМг6 и в 2,5–3 раза меньше, чем у сварных соединений из сплавов 1420, 1421 и 1423 [1–3].

Ударная вязкость по шву для сварных соединений из сплавов М40, 1150 и 1151 составляет при автоматической сварке 30...35 % и при ручной – 23...27 %, по линии сплавления – 11...25 % от ударной вязкости основного металла. Для сравнения абсолютное значение ударной вязкости по шву и линии сплавления для сварных соединений из сплава АМг6 в 3–5 раз больше. Для литейных алюминиевых сплавов АК7ч (АЛ9) и АК8М3ч (ВАЛ8) ударная вязкость находится на уровне показателей для сварного шва из сплавов М40, 1150 и 1151 и в 1,5–2,5 раза больше, чем ударная вязкость по линии сплавления для сплавов М40, 1150 и 1151 [1–4].

5. Влияние числа проходов на механические свойства сварных соединений при автоматической сварке

Сплав	Число проходов	Предел прочности, МПа, образца		Угол изгиба, ° (шов)	Ударная вязкость *KC*U, Дж/см^2	
		с выпуклостью и проплавом	без выпуклости и проплава		Шов	Линия сплавления
1150	1	286...310 / 295	275...294 / 282	7...14 / 10	3,2...5,2 / 4,1	1,9...2,6 / 2,2
	2	280...297 / 286	265...287 / 274	7...13 / 9	3,1...5,3 / 4,0	1,8...2,5 / 2,1
1151	1	298...315 / 309	275...288 / 281	10...16 / 13	3,4...5,2 / 4,1	1,6...2,5 / 2,1
	2	293...310 / 301	270...293 / 277	8...14 / 12	3,2...4,9 / 4,2	1,7...3,0 / 2,2
М40	1	280...308 / 291	274...302 / 280	13...24 / 17	2,4...3,0 / 2,8	2,0...2,4 / 2,1
	2	285...307 / 287	271...289 / 282	16...21 / 19	2,5...3,2 / 2,8	1,8...2,3 / 1,9

Механические свойства сварных соединений толщиной 7 мм при 20 °С приведены в табл. 5. Предел прочности сварных соединений при автоматической сварке на оптимальных режимах для сплавов М40, 1150 и 1151 равен соответственно 0,71; 0,65 и 0,68 от предела прочности основного металла, при ручной сварке – 0,57; 0,51 и 0,54. Для сравнения отношение пределов прочности сварного соединения и основного металла для сплавов АМг6 и 1207 на тех же толщинах при автоматической сварке равно соответственно 0,9 и 0,62, а при ручной – 0,85 и 0,55. Абсолютное значение предела прочности сварных соединений толщиной 7 мм из сплавов М40, 1150 и 1151 при автоматической и ручной сварке заметно меньше, чем аналогичных из сплавов АМг6 и 1201.

Угол изгиба сварных соединений из сплавов М40, 1150 и 1151 толщиной 7 мм при автоматической и ручной сварке в 8–10 раз меньше, чем у основного материала, и в 6–9 раз меньше, чем у сварных соединений из сплава АМг6, в 3–5 раз меньше, чем у сварных соединений из сплавов 1420, 1421,1423 [1–3].

Ударная вязкость по шву и линии сплавления сварных соединений из сплавов М40, 1150, 1151 толщиной 7 мм в 6–10 раз меньше, чем у аналогичных соединений из сплава АМг6.

Удаление проплава заподлицо с основным материалом не снижает прочности сварных соединений, а удаление проплава и выпуклости шва заподлицо с основным материалом приводит к незначительному снижению прочности сварного соединения (на 2,5... 10 %).

Исследовали влияние скорости сварки (и, соответственно, погонной энергии) на механические свойства сварных соединений из сплава 1151 толщиной 2 мм (табл. 6). Изменение скорости сварки от 30 до 8 м/ч приводит к снижению предела прочности

6. Влияние скорости сварки на механические свойства сварных соединений сплава 1151

Скорость сварки, м/ч	Предел прочности, МПа, образца		Угол изгиба, ° (шов)	Ударная вязкость *KC*U, Дж/см^2		
	с выпуклостью и проплавом	без выпуклости и проплава		Шов	Линия сплавления	ЗТВ
8	307...349 / 335	295...334 / 326	18...20 / 19	3,9..4,0 / 3,95	1,7...2,3 / 2,0	9,1...10,4 / 9,6
20	358...376 / 369	342...368 / 356	22...27 / 25	4,0...6,1 / 5,2	2,2...3,6 / 2,9	9,0..9,9 / 9,5
30	378...398 / 385	342...374 / 363	26...36 / 31	4,1...7,2 / 5,6	2,5..4,8 / 3,6	9,3..10,2 / 9,8

7. Механические свойства спеченного сплава 1201 в зависимости от режима термической обработки

Состояние материала	Направление волокна	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Состояние поставки	Долевое	422...428	12,2...13,6
	Поперечное	428...429	12,4...12,5
После закалки от 535 °С, 15 мин	Долевое	397...398	10,3...10,7
	Поперечное	408...417	15,0...15,6
После закалки от 535 °С, 15 мин и искусственного старения 190 °С, 24 ч	Долевое	426...430	11,6...15,0
	Поперечное	416...420	10,4...11,0
После закалки от 570 °С, 15 мин и искусственного старения 190 °С, 24 ч (пережог)	Долевое	146...307	8,3...10,0
	Поперечное	271...290	4,2...5,7

на 15...20 %, угла изгиба на 30...40 %, ударной вязкости по шву на 35...45 % и по линии сплавления на 35...50 %. Для сравнения аналогичное изменение скорости сварки для сплава АМг6 приводит к изменению предела прочности на 5...7 % (в 2–4 раза меньше), угла изгиба на 6...8 % (в 4–6 раз меньше), ударной вязкости по шву на 4...10 % (в 3,5–10 раз меньше). Для алюминиевых сплавов 1420, 1421, 1423 наблюдаются зависимости, аналогичные зависимостям для сплава АМг6.

Сплавы М40, 1150 и 1151 по сравнению с другими алюминиевыми и, в первую очередь, сплавом АМг6 чрезвычайно чувствительны к изменению термического цикла сварки, поэтому стабильно высокие показатели обеспечивает применение только автоматической сварки без прихваток на оптимальных режимах (скорость сварки 25...35 м/ч). Автоматическая сварка с прихватками, выполняемыми ручной сваркой, приводит к заметному снижению прочностных и пластических свойств сварных соединений (на 10...20 %). Применение одной подварки, выполненной ручной сваркой, ведет к существенному снижению прочностных и пластических свойств сварных соединений (на 15...20 %).

Одной из отрицательных особенностей сплавов М40, 1150 и 1151 является склонность к образованию трещин при резком обрыве дуги, поэтому необходимо обязательно применять оборудование, оснащенное устройством для плавного гашения дуги.

Дополнительным фактором, повышающим жаропрочность алюминиевых сплавов и снижающим склонность к образованию трещин, является использование спеченных сплавов, получаемых методами порошковой металлургии. Материалы из спеченного алюминиевого порошка выгодно отличаются от стандартных алюминиевых сплавов тем, что имеют достаточно высокую прочность при температурах 400...500 °С.

Алюминиевые сплавы, изготовленные методом порошковой металлургии, свободны от зональной ликвации, грубых оксидных и шлаковых включений. В таких сплавах отсутствует анизотропия свойств.

В рамках данной статьи исследовали состояние структуры сплава 1201, полученного порошковой металлургией, в зависимости от термической обработки и сварки.

Из панелей изготовляли образцы в долевом и поперечном направлениях. Образцы испытывали в исходном состоянии (в состоянии поставки) и после термической обработки, проведенной по различным режимам. Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Из полученных данных видно, что с повышением температуры закалки до 570 °С наблюдается снижение предела прочности и относительного удлинения сплава. Анализируя структуру материала, установлено, что с повышением температуры нагрева под закалку до 570 °С наблюдается оплавление по границам зерен (рис. 1, *а*), расслоения внут-

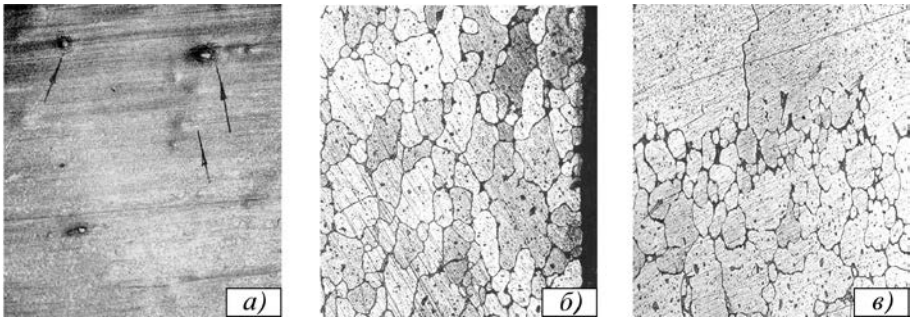


Рис. 1. Пережог спеченного сплава 1201 при нагреве под закалку до 570 °С:
а – внешний вид пузырей на поверхности образца, ×3; *б* – пережог у поверхности образца, ×100; *в* – пережог в сердцевине панели, ×100

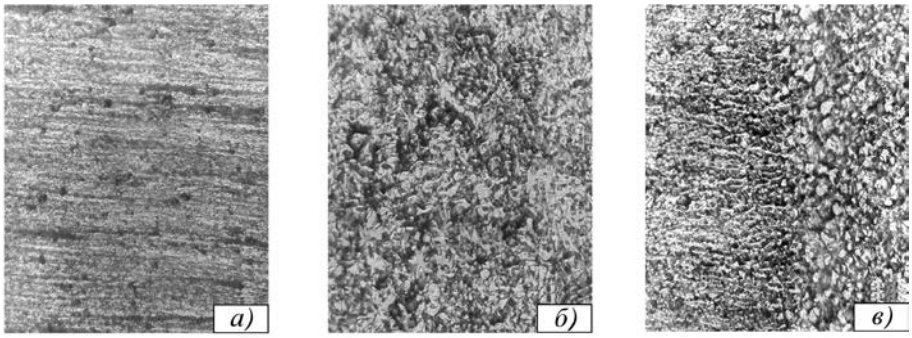


Рис. 2. Микроструктура сварного соединения спеченного сплава 1201 (×300): *а* – основной металл; *б* – металл шва; *в* – переходная зона от шва к основному металлу

ри материала (рис. 1, *б*), а на поверхности образцов – образование пузырей (рис. 1, *в*). Причем отмечено, что пузыри образовывались только с одной стороны образца. Расслоение в образце образуется в центральной части основного материала.

Сравнивая структуру прессованного и спеченного сплава 1201, при пережоге отмечено, что величина зерна в спеченном сплаве меньше, чем в прессованном сплаве.

Обычно при сварке алюминиевых сплавов в зоне термического влияния наблюдается рост зерна. В случае сварки спеченного сплава 1201 в зоне термического влияния роста зерна практически не наблюдается (рис. 2).

Выводы

1. Показатели горячеломкости жаропрочных сплавов М40, 1150 и 1151 находятся на уровне алюминиевого сплава 1201 и в 2–3 раза ниже, чем алюминиевого сплава АМг6.

2. При автоматической сварке образцов малой толщины (2 мм) без прихваток и подварок предел прочности соединений из сплавов М40, 1150 и 1151 выше, чем сплавов АМг6 и 1201, но при этом их пластические свойства в 5–8 раз ниже.

3. При автоматической и ручной сварке образцов больших толщин (7 мм) прочностные свойства соединений из сплавов М40, 1150 и 1151 находятся на уровне свойств соединений из сплавов АМг6 и 1201, при этом их пластические свойства в 4–10 раз ниже.

Сплавы М40, 1150 и 1151 имеют преимущества перед другими известными алюминиевыми сплавами только при температуре эксплуатации сварных конструкций, начиная от 150...200 и особенно 250 °С. Применение этих сплавов при более низких температурах принципиально не оправдано.

4. Механические свойства сплава 1201, полученного порошковой металлургией, практически не отличаются от конструкционного деформируемого сплава 1201. При перегреве сплава 1201 рост зерна в сплаве, полученном методом порошковой металлургии, менее активен, чем на конструкционном деформируемом сплаве.

При сварке порошкового сплава 1201 в зоне термического влияния сварного соединения роста зерна не наблюдается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Федосеев В.А., Рязанцев В.И.** Механические свойства сварных соединений из новых алюминиевых деформируемых сплавов // Сварочное производство. 1994. № 7. С. 2–4.

2. **Рязанцев В.И., Федосеев В.А.** Механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов системы Al–Cu // Сварочное производство. 1994. № 12. С. 4–7.

3. **Рязанцев В.И.** Свариваемость новых алюминиевых и магниевых сплавов //Автоматическая сварка. 1991. № 7. С. 31–33.

4. **Рязанцев В.И., Федосеев В.А., Юкаев Н.И.** Дуговая сварка литейных алюминиевых сплавов с деформируемыми алюминиевыми сплавами//Сварочное производство. 1994. № 3. С. 17–19.

Марина Алексеевна Гуреева, канд. техн. наук;
Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук;
Станислав Ильич Феклистов, д-р техн. наук;
Владимир Иванович Рязанцев, канд. техн. наук;
Сергей Васильевич Данилкин, инженер

УДК 621.975

А.В. Власов *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Моделирование поперечных вибраций автомата АО334 на холостых ходах

Приведена динамическая модель для анализа поперечных вибраций горячештамповочного автомата. Даны рекомендации по совершенствованию конструкции автомата, основанные на результатах математического моделирования.

The dynamic model for the analysis of cross-section oscillation of automatic hot die forming machinery is presented. Recommendations on development of equipment, based on results of mathematical simulation are given.

Ключевые слова: математическое моделирование; вибрация; горячештамповочный автомат.

Keywords: mathematical simulation; oscillation; automatic hot die forming machinery.

Горячештамповочный автомат АО334 предназначен для точной горячей объемной штамповки деталей из конструкционных и легированных сталей и цветных металлов массой до 0,7 кг.

Кинематическая схема автомата обеспечивает взаимное согласование движения основных и вспомогательных исполнительных механизмов. Основным исполнительным механизмом автомата является кривошипно-ползунный механизм с горизонтальным перемещением ползуна. Привод вспомогательных механизмов осуществляется с помощью кулачковых механизмов, преимущественно с кинематическим замыканием. Согласование движения – с помощью распределительных валов, вращающихся с угловой скоростью кривошипного вала привода основного исполнительного механизма.

Основной проблемой, возникающей при работе автомата, являются повышенные вибрации при увеличении числа ходов до 140 в минуту.

По свидетельству конструкторов завода-изготовителя наблюдались колебания станины автомата в поперечном направлении при пусконаладочных работах. Наладчики отмечали поломку питателей системы смазки при повышении частоты ходов, что также является причиной повышенных вибраций. Повышенные вибрации наблюдались даже на холостых ходах машины.

Одной из причин поперечных вибраций является работа вспомогательных механизмов реза и переноса. Эти механизмы работают с частотой, соответствующей текущей производительности автомата и обладают значительными массами, перемещающимися в поперечном направлении. Так, масса механизмов продольного перемещения и зажима клещей, перемещающихся в поперечном направлении, составляет около 180 кг. Максимальное ускорение при числе ходов 140 в минуту составляет около 70 м/с^2 (больше 7g). Таким образом, только со стороны механизма переноса на станину действует периодическая сила амплитудой 25 кН и частотой 2,33 Гц. Дополнительное негативное воздействие оказывает и механизм реза, обладающий также значительной массой, перемещающейся в поперечном направлении.

Таким образом, целью исследования является анализ влияния механизмов реза и переноса на колебания станины в поперечной плоскости и выработка на этой основе практических рекомендаций по снижению этих вибраций.

Описание математической модели и подготовка исходных данных. Основой для создания математической модели был выбран программный комплекс PRADIS, позволяющий выполнить анализ динамических процессов в механических системах и системах иной физической природы [1]. Этот комплекс

используется нами уже более 10 лет для анализа динамических процессов в различном кузнечно-штамповочном оборудовании [2].

При разработке динамической модели автомата были приняты следующие основные допущения:

1) рассмотрен только холостой ход;

2) на поперечные вибрации станины влияют только механизмы переноса и реза;

3) угловая скорость вращения кулачков постоянна;

4) рассматриваются только процессы, происходящие в поперечных плоскостях;

5) жесткости всех элементов конструкции постоянны;

6) трение в кинематических парах подчиняется закону Кулона;

7) диссипацией энергии, связанной с внутренним трением в материалах, пренебрегаем;

8) инерционные свойства элементов станины сосредоточены в центрах масс.

Расчетная схема приведена на рис. 1. Звенья механизмов реза и переноса изображены в положении, соответствующем 90° циклограммы.

Упругие, инерционные и кинематические свойства всех деталей, изображенных на схеме рис.1 при их движении в плоскости XOY, а также трение и зазоры в кинематических парах, реальный профиль кулаков, с учетом их жесткости и возможности размыкания контакта между кулаком и роликом, учтены в динамической модели. Обобщенная динамическая модель имеет 187 степеней свободы [3].

Модель станины состоит из трех фрагментов, соединенных между собой. Отличительной особенностью модели является то, что реальная твердотельная конструкция заменена фермой, составленной из балок. Свойства элементов ферм подбирались таким образом, чтобы податливости элементов станины и эквивалентной ферменной конструкции были близки между собой. Инерционные свойства элементов станины помещены в центры масс.

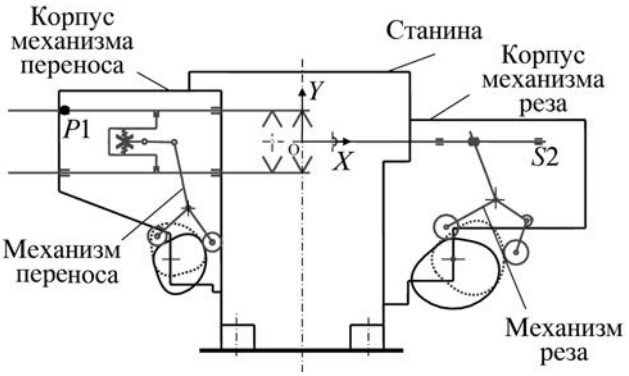


Рис. 1. Расчетная схема для анализа поперечных вибраций автомата АО334

Геометрические параметры элементов моделей готовились с использованием твердотельной модели автомата, созданной в ОАО "Тяжпрессмаш" в среде SOLID WORKS [3].

В процессе расчета производили профилирование кулаков. Предлагаемая нами методика профилирования основана на моделировании обращенного движения механизма с помощью программного комплекса PRADIS [4]. В этом случае исполнительное звено (например, грейферная линейка подачи) из ведомого становится ведущим.

Результаты моделирования. Моделирование проводили в два этапа.

На первом этапе анализировали влияние параметров, которыми нельзя варьировать для снижения вибрации. К таким параметрам относится влияние зазоров в кулачковых механизмах, частоты ходов автомата, влияние каждого механизма в отдельности. На этом этапе анализировали также влияние жесткости станины и корпусов механизмов переноса и реза и работу предохранителя механизма переноса.

Амплитудные значения ускорения захватов механизма переноса в поперечном направлении составляют +76,1...–75,3 м/с^2, ножа механизма реза – +62,2 ... –60,6 м/с^2.

Вибрации станины оценивали по вертикальным и горизонтальным перемещениям точек $P1$ (ось симметрии крайней верхней опоры штанги механизма переноса в корпусе механизма переноса), $S2$ (ось симметрии крайней опоры штанги механизма реза в корпусе механизма реза) и углу поворота центра масс станины.

Размах колебаний составляет: $xP1$ = 0,2618 мм, $yP1$ = 0,0911 мм, $xS2$ = 0,2512 мм, $yS2$ = 0,1463 мм; φ = 0,005°.

Анализ результатов показывает, что максимальные отклонения точно соответствуют моментам появления амплитудных значений ускорений механизма переноса. Все исследованные колебания совпадают по частоте и фазе, поэтому в дальнейшем достаточно исследовать только одни колебания, например $xP1$.

Таким образом, можно сделать вывод, что поперечные вибрации станины являются вынужденными колебаниями, причем основной вынуждающей

силой является сила инерции поперечного перемещения масс механизма переноса.

Поскольку данные о значении зазоров, получающихся в результате износа в процессе эксплуатации, отсутствуют, при моделировании принята одинаковая величина зазоров, равная 0,4 мм.

Добавление зазоров влияет на максимальные ускорения. Наибольшее влияние (около 11 %) зазоры оказывают на ускорение механизма переноса (размах +84,8 ... –78,4 м/с^2). Ускорение механизма реза изменяется незначительно.

Увеличение ускорения сказывается на размахе колебаний станины. Размах колебаний $xP1$ увеличивается на 19 %, а размах колебаний $yP1$ – на 35 %. Частоты колебаний практически не изменились.

Предварительный анализ показал, что на вибрации максимальное влияние оказывает механизм переноса. Этот вопрос был подробно изучен моделированием автомата с отключенными механизмами реза или переноса.

При отключении механизма реза характер кривой поперечных колебаний станины не изменяется, уменьшается только размах колебаний от 0,2618 до 0,1704 мм. Отключение механизма переноса изменяет кривую качественно, фазы колебаний начинают совпадать с фазами ускорений механизма переноса, а максимальный размах колебаний уменьшается до 0,1 мм.

На втором этапе выполняли анализ возможных способов модернизации конструкции в целях снижения вибрации.

Предварительный анализ, результаты которого были приведены выше, показал, что основной причиной возникновения продольных вибрации в рамках созданной модели являются инерционные динамические нагрузки, вызванные большими ускорениями поперечно перемещающихся масс механизма переноса. Снижение этих нагрузок при модернизации автомата может быть достигнуто следующими способами:

– снижением массы поперечно перемещающихся частей;

– увеличением фазовых углов подъема и опускания профиля кулаков;

– изменением закона профилирования;

– уравновешиванием поперечно перемещающихся масс.

На вибрации могут оказывать влияние также геометрические параметры (координаты осей качания рычагов, осей вращения кулаков, высота оси перемещения, габаритные размеры в поперечной плоскости и др.), но изменить эти параметры путем модернизации конструкции не представляется возможным, поскольку требуется перепроектировать практически весь автомат. Кроме того, на вибрации в поперечном направлении может оказывать влияние неуравновешенность автомата в продольном направлении, однако этот фактор в данной модели не учтен.

Таким образом, анализу подвергали только те изменения конструкции, которые можно реализовать в рамках модернизации, т.е. не меняя базовых деталей. Положения всех осей и опор остаются при таком способе без изменения.

Поскольку расчет изменения массы поперечно перемещающихся частей возможен только после конструктивной проработки, анализ влияния производился путем общего снижения массы всех поперечно перемещающихся частей на 25 %.

Результаты расчетов показывают, что уменьшение массы деталей механизма реза практически не оказывает никакого влияния на вибрации станины, в то же время, снижение массы деталей механизма переноса позволяет снизить амплитуду поперечных колебаний от 0,2618 до 0,2156 мм, т.е. на 17 %.

Анализ циклограммы работы автомата показал, что существуют достаточно большие цикловые промежутки, в которых осуществляется выстой всех механизмов автомата. Это позволило сделать вывод о возможности изменения фазовых углов для механизмов переноса и реза. Величины изменения фазовых углов показаны на новой циклограмме в сравнении со старой (рис. 2).

Таким образом, фазовые углы подъема и опускания профиля кулаков увеличены на 20° за счет уменьшения выстоев. Фазовые и цикловые углы механизма зажима заготовки и механизма поворота клещей не изменяли.

Изменение фазовых углов потребовало заново профилировать кулаки переноса и реза в соответствии с новой циклограммой. На данном этапе профилирование осуществляли по закону синусоиды.

На рис. 3 приведены внешние контуры рабочего профиля основного кулака механизма переноса в сравнении с исходным профилем. Дано также сравнение углов давления для обоих кулаков. Новый кулак по сравнению с существующим имеет меньшие углы давления.

Моделирование автомата с новой циклограммой при синусоидальном профиле кулаков показало, что максимальные ускорения и размах колебаний снижаются примерно на 30 % (табл. 1).

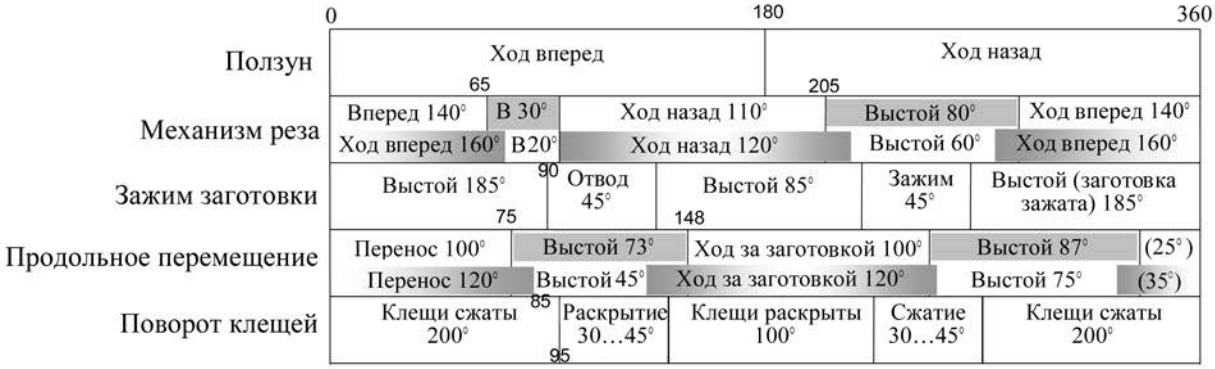


Рис. 2. Изменение циклограммы работы автомата

Рис. 3. Профили кулаков механизма переноса

Уменьшения максимальных ускорений, а следовательно, и размаха колебаний, можно ожидать и от изменения закона профилирования кулаков.

Так, применение закона модифицированной трапеции (закон Неклютина*) с относительной величиной переднего фронта трапеции $k = 0{,}1$ при тех же фазовых углах для механизма переноса дает теоретическое уменьшение коэффициента ускорения на 34 % (рис. 4).

Для выполнения моделирования были предварительно спрофилированы кулаки по закону Неклютина с $k = 0{,}1$ по исходной циклограмме. Результаты моделирования показали, что реальное уменьшение максимального ускорения значительно меньше ожидаемого, соответственно незначительно уменьшился и размах колебаний.

Анализ полученных результатов показывает, что применение закона модифицированной трапеции

1. Анализ влияния фазовых углов циклограммы

Циклограмма	Ускорение переноса, м/с^2		Размах колебаний $xP1$, мм
	максимальное	минимальное	
Исходная циклограмма	76,1	–75,3	0,2618
Новая циклограмма	50,9 (–33 %)	–53,1 (–30 %)	0,1861 (–29 %)

повышает динамичность конструкции (табл. 2). Резкий рост ускорения в начале профиля приводит к колебаниям, увеличению максимальных значений ускорения, по сравнению с теоретическими и, следовательно, увеличению инерционных нагрузок.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение законов с большим значением пульса (третья производная от перемещения), к которым относится закон модифицированной трапеции, огра-

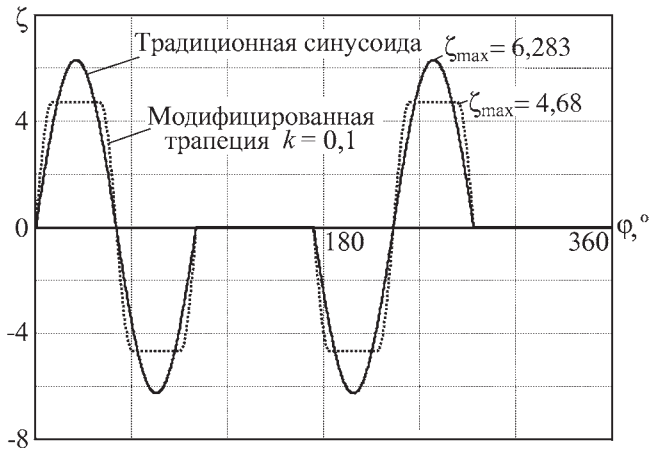


Рис. 4. Коэффициенты ускорения для различных законов профилирования

* Левитский Н.И. Кулачковые механизмы. М.: Машиностроение, 1964.

2. Анализ влияния законов профилирования кулаков

Закон	Ускорение переноса, м/с^2		Размах колебаний $xP1$, мм
	максимальное	минимальное	
Исходный закон	76,1	–75,3	0,2618
Закон Неклютина	64,6 (–15 %)	–65,6 (–13 %)	0,2434 (–7 %)

ничивается увеличением инерционных нагрузок и значительного эффекта не дает.

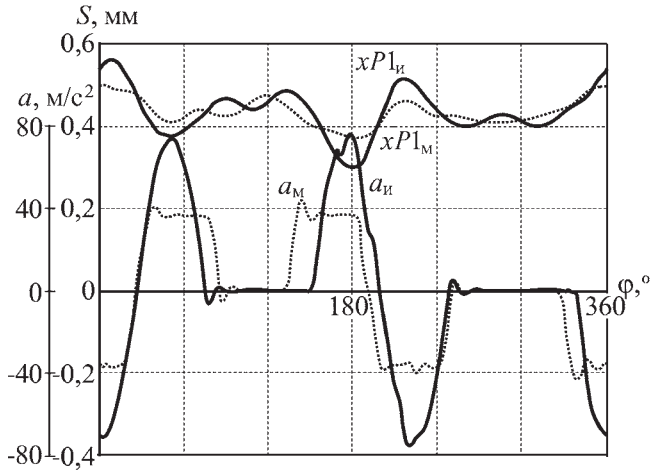


Рис. 5. Поперечные вибрации автомата

3. Сравнение результатов различных способов уменьшения вибраций

Циклограмма	Ускорение переноса		Размах колебаний $xP1$, мм
	максимальное	минимальное	
Исходная циклограмма	76,1	–75,3	0,2618
Новая циклограмма	50,9 (–33 %)	–53,1 (–30 %)	0,1861 (–29 %)
Новая циклограмма, профиль по Неклютину, $k = 0,1$	41,6 (–45 %)	–42,8 (44 %)	0,1491 (–43 %)
Новая циклограмма, профиль по Неклютину, $k = 0,1$, уменьшение масс на 25 %	43,7 (–43 %)	–42,7 (–44 %)	0,127 (–52 %)

Анализ совместного влияния закона профилирования, инерционных параметров и циклограммы работы механизмов. Выполнили анализ совместного влияния различных способов снижения вибраций, рассмотренных выше. На рис. 5 и в табл. 3 приведено сравнение результатов моделирования ускорений механизма переноса и поперечных перемещений точки $P1$ станины для исходного (сплошные линии) и модернизированного (штриховые линии) механизмов.

Выводы

1. Не обнаружено конструктивных параметров, которые позволили бы снизить частоту вибраций, поскольку она полностью совпадает с частотой движения механизмов автомата.

2. Максимальное влияние на поперечные вибрации автомата оказывают поперечно перемещающиеся массы механизма переноса, которые при значительном ускорении возбуждают большие инерционные силы.

3. Зазоры в кулачковых механизмах увеличивают поперечные вибрации, однако это увеличение носит количественный, а не качественный характер.

4. Максимальное влияние на снижение амплитуды поперечных вибраций оказывает увеличение фазовых углов кулаков механизма реза и снижение масс поперечно перемещающихся частей.

5. Изменение закона профилирования кулаков в целях уменьшения максимальных ускорений в пользу законов с увеличенным пульсом не приводит к существенным уменьшениям вибраций при сохранении исходных параметров конструкции.

6. Существенное (более чем в 2 раза) уменьшение амплитуды поперечных вибраций может быть достигнуто комплексом мер, включающих в себя уменьшение масс, изменение циклограммы работы автомата, изменение закона профилирования кулаков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Курдюк С.А., Шмелев Е.Н.** Особенности формирования математических моделей технических объектов средствами программного комплекса PRADIS // Информационные технологии. 1996. № 6. С. 15–25.

2. **Власов А.В.** Имитационное моделирование динамики кузнечно-штамповочного оборудования // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 1. С. 29–33.

3. **Власов А.В., Герасимов Д.А., Уваров А.Г.** Математическая модель для анализа и выявления причин повышенных вибраций автомата АО334 // Известия ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. 2006. Вып. 2. С. 56–65.

4. **Власов А.В.** Профилирование кулаков и анализ динамики кулачковых механизмов кузнечно-штамповочного оборудования // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1998. № 2. С. 10–19.

Андрей Викторович Власов, д-р техн. наук

УДК 621.791:661.88

М.В. Семеноженков, А.Т. Крук, В.В. Пешков
(Воронежский государственный технический университет)

Рационализация схем нагружения элементов конструкций из титана при их сварке давлением

Обоснованы режимы и схемы технологического процесса сварки давлением многослойных конструкций из титана, обеспечивающие получение качественных изделий при минимальных температуре, давлении и времени выдержки под давлением с учетом соотношения геометрических параметров соединяемых элементов.

The article deals with the technical process of under pressure welding of a multi-layered titanium construction. It substantiates the possible conditions and schemes which provide getting construction of high quality, while temperature, pressure and time of mature under pressure remain minimum at a ratio to the geometrical parameters of the elements being joined.

Ключевые слова: технология; сварка; давление; трение; схема.

Keywords: technology; welding; pressure; friction; scheme.

Процесс получения неразъемного соединения сваркой давлением сопровождается развитием пластических деформаций в местах физического контакта свариваемых элементов конструкции.

Неравномерное распределение контактных сил порождает появление зон затрудненного деформирования (Тарновский И.Я. и др. Контактные напряжения при пластической деформации. М.: Металлургия, 1966) и приводит к уменьшению площади физического контакта и ухудшению качества сварки. Решение задачи получения пластических деформаций по всей площади контактных поверхностей осуществляется за счет ужесточения параметров технологического процесса: повышения температуры заготовок до 10000 °С, технологического давления до 100 МПа и увеличения времени выдержки под давлением до 100...120 мин [1].

В этих условиях проблемными являются вопросы остаточных деформаций и потери устойчивости соединяемых элементов, возможно получение многослойных конструкций с недопустимым искажением геометрической формы изделия. В связи с этим актуальным является вопрос определения схем технологического процесса с минимальными значениями технологического давления и температуры при условии достижения необходимого качества сварки.

А.С. Гельманом (Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970) установлено, что при сварке давлением и наличии сдвигающих сил при касательных контактных напряжениях, значительно меньших предела текучести, на контактирующих поверхностях образуются прочные участки схватывания.

Существенное влияние касательных сил на поверхности свариваемых элементов, отношение которых к сжимающим силам меньше коэффициента трения, выявили J.S. Mac Farlane и D. Tabor. Полученный эффект авторы объясняют тем, что по условию пластичности Мизеса при совместном действии нормальных σ и касательных τ напряжений состояние пластичности достигается намного раньше, нежели при действии только нормальных напряжений ($\sigma^2 + 3\tau^2 = \sigma_0^2$, где σ_0 – эквивалентное напряжение). Известен эффект снижения (в 5–10 раз) технологического усилия объемной штамповки при использовании комбинированного нагружения (осадки с кручением) (Ганаго О.А. и др. Исследование процесса осадки с кручением тонкого слоя // Машиностроение. 1980. № 6). Также отмечается более равномерное распределение давления на контактной поверхности при использовании технологического процесса осадки с кручением.

Это дает основание применения схемы комбинированного нагружения при сварке давлением в целях получения качественных конструкций при нормальных напряжениях, намного меньших предела текучести. При этом необходимы обоснования условий и параметров комбинированного нагружения. Определение оптимального направления действия сдвигающих сил выполнено на основе рассмотрения решения задачи (рис. 1) давления полосового элемента *1* (заполнителя) шириной *b* на упругий лист *2* толщиной *a* (В.М. Александров, Б.Л. Ромалис. Контактные задачи в машиностроении. М.: Машиностроение. 1986). Верхний лист *3* свариваемой конструкциии нагружен технологиче-

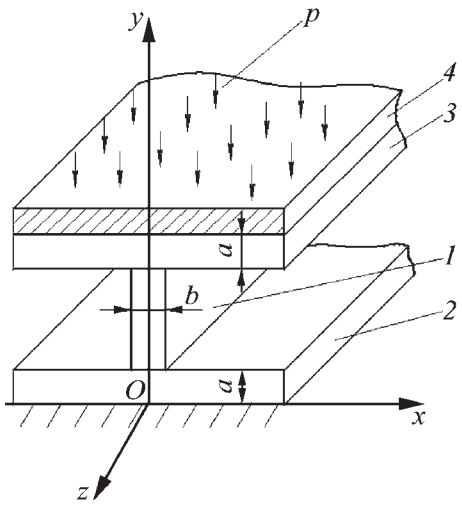


Рис. 1. Схема нагружения свариваемых элементов

ским давлением p сварки через технологический лист *4*.

Граничные условия рассматриваемой задачи:

$v(xOz) = 0$; $\tau_{xy}(xOz) = 0$; $\tau_{yz}(xOz) = 0$; $\tau_{xy}(xaz) = 0$; $\tau_{yz}(xaz) = 0$; $\sigma_y(xaz) = 0$ – на недеформированной поверхности листа (v – перемещение листа в направлении оси Oy).

Предполагается, что нормальная P и сдвигающая P_x (поперечная в направлении оси x) силы связаны соотношением $P_x = fP$ (f – коэффициент трения). Сжимающая сила P, отнесенная к длине заполнителя вдоль оси z, зависит от давления p.

Распределение давления по ширине заполнителя ($-0{,}5b \le x \le 0{,}5b$)

$$q(x) = P\cos\pi\lambda[\pi(0{,}5b + x)^{0{,}5+\lambda}(0{,}5b - x)^{0{,}5-\lambda}]^{-1}, \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{1}{\pi}\mathrm{arctg}[f\frac{E}{2}(1-\mu^2)G]$; E – модуль упругости; G – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона материалов свариваемых элементов.

Распределение давления $q(x)$ между заполнителем и нижним листом при различных значениях коэффициента трения $f = 0$; 0,2; 0,4, вычисленное по зависимости (1) при значениях: $E = 1{,}1\cdot10^5$ МПа, $G = 0{,}5\cdot10^5$ МПа, $\mu = 0{,}4$, $P = 1000$ кН/м, $b = 4$ мм, приведены на рис. 2.

Видно, что с повышением коэффициента трения f неравномерность усиливается, и такое решение нельзя признать эффективным.

Снижение коэффициента трения f путем применения смазочного материал нельзя считать рациональным решением, так как при наличии между свариваемыми элементами промежуточной среды ухудшаются условия для возникновения адгезионных связей.

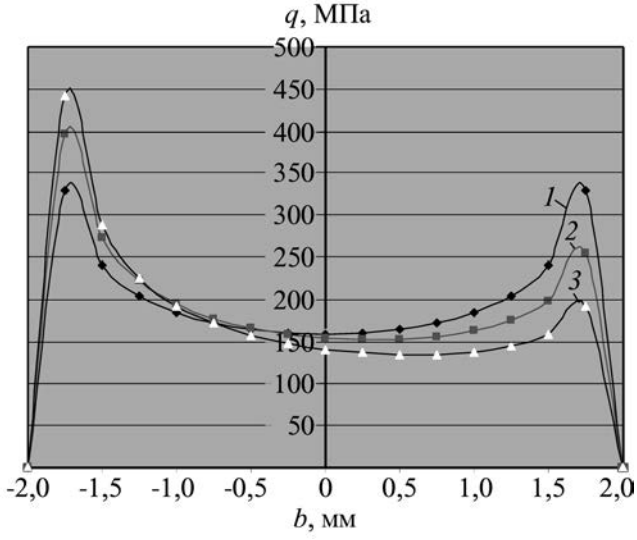


Рис. 2. Распределение контактного давления между заполнителем и нижним местом при различных значениях коэффициента трения:
1 – $f = 0$; *2* – $f = 0{,}2$; *3* – $f = 0{,}4$

Поэтому необходим поиск решения, исключающего влияние сил трения на неравномерность распределения контактных сил. Как известно, силы трения всегда направлены против скорости скольжения. Таким образом, если к сжимаемым элементам приложить силу, действующую вдоль оси z, то силы трения (касательные контактные напряжения) развернутся в направлении оси z, и их влияние на возникновение зон затрудненного деформирования в направлении оси x значительно снизится. Это утверждение основывается также на принципе независимости действия сил. При такой схеме нагружения распределение нормальных сил вне зависимости от коэффициента трения f будет соответствовать эпюре *1* на рис. 2.

Эффективность такой схемы нагружения подтверждается также результатами исследований технологического процесса осадки с кручением, когда изменение направления сил трения (при осадке – радиальное, а при осадке с кручением – окружное) привело к значительному уменьшению бочкообразности получаемой заготовки и, как уже было сказано, к более чем 5-кратному снижению необходимого усилия штамповки.

Исследуя контактные напряжения при пластической деформации, И.Я. Тарновский, А.Н. Леванов и М.И. Поксеваткин установили также тесную связь контактного трения с соотношением разме-

ров деформируемых тел, что указывает на зависимость закономерностей распределения контактных сил от соотношения размеров сжимаемых элементов.

Развитие задачи для получения информации о распределении контактных сил и напряженного состояния в зоне контакта в момент, предшествующий началу появления пластических деформаций (началу процесса сварки), в зависимости от соотношений размеров элементов свариваемой конструкции с учетом упругой податливости заполнителя и листов несущей обшивки выполнено методом конечных элементов (МКЭ) с использованием модуля Pro/MECHANICA программного комплекса Pro/ENGINEER. Разбиение на конечные элементы проводилось по схеме, изложенной в работе [2].

Задача решалась в упругой области при принятом модуле упругости материалов заполнителя и несущей обшивки E = 1,1·10 МПа, коэффициенте Пуассона μ = 0,35. Технологическое давление сварки принималось равным p = 1 МПа. Толщина листов обшивки принята равной a = 1 мм, ширина листа заполнителя – b = 0,2...1 мм. Высота заполнителя (расстояние между листами обшивки) – h = 2...10 мм. Нагружение верхнего листа обшивки осуществлялось непосредственно технологическим давлением, под действием которого лист может прогибаться, а нижнего листа обшивки – через технологический лист. Такое моделирование позволяет оценить влияние условий нагружения свариваемых элементов технологическим давлением на характер напряженно-деформированного состояния в зоне сварки.

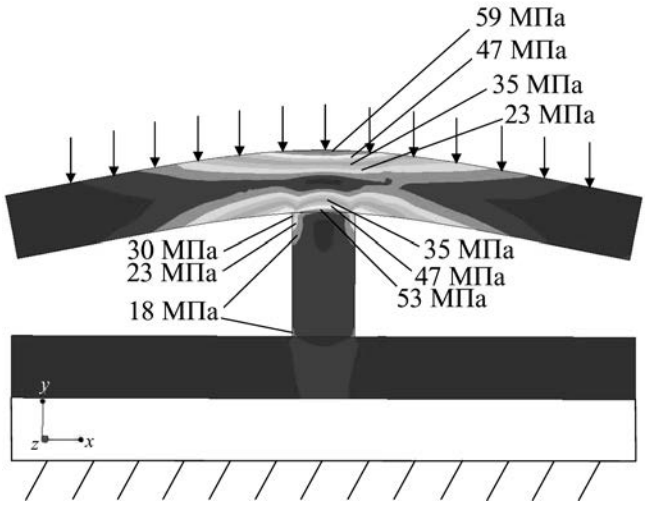


Рис. 3. Напряженное состояние свариваемой конструкции (b = = 1 мм, h = 2 мм)

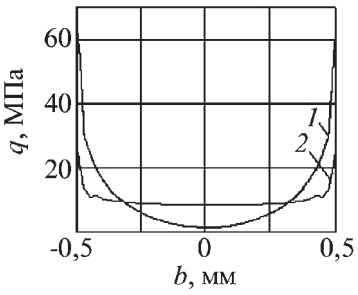


Рис. 4. Распределение контактных сил при ширине заполнителя b = 1 мм:
1 – в верхнем листе;
2 – в нижнем листе

В результате моделирования системы получена общая картина напряженного состояния элементов свариваемой конструкции (рис. 3).

Важно отметить, что напряжения сжатия (σ_x) нижних волокон верхнего листа имеют максимальные значения в средней части контактной зоны и убывают к ее краям. Это указывает на то, что поперечные деформации ε_y (в направлении оси y) распределены вдоль контактной поверхности в направлении оси x также неравномерно, достигая максимальных значений в средней части.

На рис. 4 приведены эпюры распределения контактных сил при ширине заполнителя b = 1 мм для верхнего и нижнего листов. Видно существенное влияние условий нагружения на неравномерность распределения контактных сил. Выявлена также зависимость концентрации контактных сил от соотношения размеров свариваемых элементов.

При толщине заполнителя b = 0,2 мм (рис. 5) неравномерность контактных напряжений между заполнителем и верхним листом значительно ниже. Отношение значений максимальных сил, действующих по краям контакта, к средним величинам составляет для верхнего листа (h = 2 мм, b = 0,2 мм) k = 1,6 , а для варианта с размерами h = 2 мм, b = = 1 мм значение коэффициента концентрации контактных сил k = 6,2.

Видно (см. рис. 4, эпюра *1*), что для последнего варианта значения контактных сил в средней части контакта верхнего листа с заполнителем близки к нулю и, следовательно, при дальнейшем увеличении толщины в средней части контакта возможно раскрытие стыка, что негативно скажется на качестве сварного соединения.

Между нижним листом, давление на который передается через технологический лист, и заполнителем эпюра аналогична варианту, представленному на рис. 4 (эпюра 2) и k = 2,6. Таким образом, установлено, что использование технологического листа исключает влияние соотношения размеров

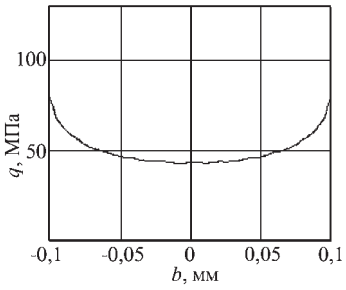


Рис. 5. Распределение контактных сил при ширине заполнителя b = 2 мм

свариваемых элементов на характер распределения контактных сил.

Выводы

1. Решение контактной задачи с помощью МКЭ, учитывающего поперечные деформации элементов конструкции (листов обшивки), позволило установить, что использование технологического листа при воздействии давления на элементы свариваемой конструкции приводит к исключению влияния соотношения конструктивных параметров свариваемых элементов на характер распределения контактных сил.

2. На основе рассмотрения контактных задач с учетом действия сил трения предложена и обоснована схема комбинированного нагружения, обеспечивающая наиболее равномерное распределение сил контактного давления и минимизацию вероятности возникновения зон затрудненной деформации, использование которой позволяет реализовать пластическое состояние на контактных поверхностях при минимальных значениях технологического давления и температуры.

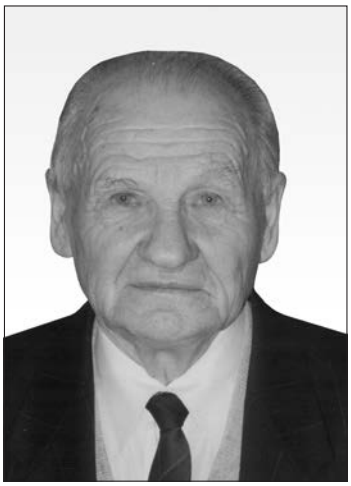
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бондарь А.В., Пешков В.В., Киреев Л.С., Шурупов В.В.** Диффузионная сварка титана и его сплавов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1998. 256 с.

2. **Семеноженков М.В., Пешков В.В.** Влияние соотношений геометрических параметров элементов конструкций из титана на распределение контактных сил при сварке давлением // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж, 2007. С. 64–70.

Максим Владимирович Семеноженков, инженер;
Александр Тимофеевич Крук, д-р техн. наук;
Владимир Владимирович Пешков, д-р техн. наук

Памяти Евгения Николаевича Ланского (1924–2009 гг.)



12 июля 2009 г. после тяжелой болезни на 86-м году жизни скончался выдающийся ученый, д-р техн. наук, профессор Евгений Николаевич Ланской.

Е.Н. Ланской закончил Мосстанкин в 1945 г. и был направлен на Барнаульский завод механических прессов, где работал в должности технолога, конструктора и главного конструктора завода.

В 1950 г. был принят в аспирантуру Станкина, где и начал научно-педагогическую деятельность, которой посвятил всю свою жизнь.

В 1954 г. Е.Н. Ланской защитил кандидатскую, а в 1971 г. – докторскую диссертации. С 1977 по 1994 г. Евгений Николаевич возглавлял кафедру "Оборудование и технология ковки и штамповки", в настоящее время кафедра "Системы пластического деформирования".

За это время им подготовлено 5 докторов технических наук, более 20 кандидатов наук.

Евгений Николаевич создал школу по научному направлению, связанному с конструированием современных кривошипных прессов. Его книга "Кузнечно-штамповочное оборудование" (1982 г.) до сих пор является основным учебником для студентов технических вузов России, обучающихся по специальности "Машины и технология обработки металлов давлением". Евгений Николаевич является автором более 200 научных работ, изобретений и авторских свидетельств. Много времени уделял работе в диссертационном совете МГТУ "Станкин", членом которого он являлся.

Его труд отмечен званием "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР", а также "Почетный профессор Станкина".

В 1984 г. Е.Н. Ланской получил звание Лауреата Государственной премии СССР за цикл работ по совершенствованию конструкций тяжелых механических прессов.

С 1985 по 1988 г. Е.Н. Ланской был главным редактором журнала "Кузнечно-штамповочное производство", а с 1989 г. – заместителем главного редактора.

Широкая эрудиция, большая работоспособность, доброжелательное отношение к людям снискали Евгению Николаевичу большой авторитет среди специалистов не только нашей страны, но и за рубежом.

Светлая память о Евгении Николаевиче Ланском,
талантливом ученом и педагоге,
скромном и отзывчивом человеке
навсегда останется в памяти его коллег и друзей.

УДК 621.7.044.2

В.Е. Свистунов, В.А. Чубуков, А.Г. Матвеев *(Московский государственный индустриальный технический университет)*,
А.А. Гартвиг *(ООО "КванторФорм", Москва)*

Проектирование кривошипных кузнечно-прессовых машин с использованием соотношений подобия

Изложена методика проектирования гамм кривошипных машин, позволяющая на основе объекта-представителя определить с приемлемой точностью все параметры множества подобных ему объектов других типоразмеров.

The methods of gamm crank fording machine designing are presented, which allow to determine all the parameters of numerous similar object with acceptable accuracy.

Ключевые слова: машиностроение; обработка металлов давлением; кузнечно-штамповочное оборудование; кривошипные прессы.

Keywords: machine-building; mechanical working; fording equipment; crank presses.

Назовем *гаммой* совокупность кузнечно-прессовых машин (КПМ) одинакового технологического назначения и конструктивного исполнения, но разных типоразмеров. Каждый типоразмер отличается от ближайших значением главного параметра. Для подавляющего большинства кривошипных машин это номинальная сила, хотя в некоторых случаях это может быть толщина разрезаемого металла (листовые ножницы) или какой-либо иной параметр. В дальнейшем будем использовать для краткости только номинальную силу. Переход на другие главные параметры ясен из дальнейшего изложения.

Величины главных параметров КПМ выбираются на основе индексированного ряда предпочтительных величин [1]. Ряд представляет собой геометрическую прогрессию с первым членом, равным 0,1, и показателем k, определяемым соотношением

$$\lg k = 0{,}1, \qquad (1)$$

что позволяет присвоить каждому члену этой прогрессии двухзначный индекс в десятичной системе позиционирования. Например, член, значение которого равно 250, имеет индекс 34 (табл. 1) и т.д. Всего в таблице 100 членов.

Допустим, некая воображаемая идеализированная гамма кривошипных машин состоит из a типоразмеров, каждый из которых при известной конструкции описывается b параметрами различной размерности: длины, мощности, энергии, времени, массы, площади, момента инерции и т.д. Вся гамма, соответственно, описывается количеством численных параметров разной размерности, равным произведению ab. Пусть i – порядковый номер конкретного типоразмера рассматриваемой гаммы, принадлежащий части натурального ряда $1 \le i \le a$. Пусть j – порядковый номер параметра в перечне параметров выбранной для гаммы конструкции кривошипной машины, принадлежащий части натурального ряда $1 \le j \le b$. Таким образом, каждый численный параметр гаммы имеет координатный индекс (i, j).

При проектировании новой конкурентоспособной гаммы сначала отрабатывается один типоразмер, на котором проверяют идеи, лежащие в основе будущей гаммы.

Чтобы ускорить и удешевить освоение остальных типоразмеров гаммы, целесообразно прибегнуть к проектированию по коэффициентам, когда каждый параметр нового типоразмера равен произведению соответствующего параметра уже созданного типоразмера на определенный коэффициент. При научно обоснованном выборе коэффициентов связь параметров обоих типоразмеров должна согласовываться с фундаментальной теорией подобия (Теория подобия и размерностей. Моделирование / П.М. Алабужев и др. М.: Высшая школа, 1967).

Примем следующие *четыре условия подобия* кривошипных машин.

Первое условие (условие однозначности) заключается в том, что величина каждого параметра нового пресса гаммы должна быть заданной одно-

1. Индексированный ряд предпочтительных величин

I \ II	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,1	0,125	0,16	0,2	0,25	0,315	0,4	0,5	0,63	0,8
1	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8
2	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
3	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
4	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
5	10000	12500	16000	20000	25000	31500	40000	50000	63000	80000
6	$10\cdot10^4$	$12{,}5\cdot10^4$	$16\cdot10^4$	$20\cdot10^4$	$25\cdot10^4$	$31{,}5\cdot10^4$	$40\cdot10^4$	$50\cdot10^4$	$63\cdot10^4$	$80\cdot10^4$
7	$10\cdot10^5$	$12{,}5\cdot10^5$	$16\cdot10^5$	$20\cdot10^5$	$25\cdot10^5$	$31{,}5\cdot10^5$	$40\cdot10^5$	$50\cdot10^5$	$63\cdot10^5$	$80\cdot10^5$
8	$10\cdot10^6$	$12{,}5\cdot10^6$	$16\cdot10^6$	$20\cdot10^6$	$25\cdot10^6$	$31{,}5\cdot10^6$	$40\cdot10^6$	$50\cdot10^6$	$63\cdot10^6$	$80\cdot10^6$
9	$10\cdot10^7$	$12{,}5\cdot10^7$	$16\cdot10^7$	$20\cdot10^7$	$25\cdot10^7$	$31{,}5\cdot10^7$	$40\cdot10^7$	$50\cdot10^7$	$63\cdot10^7$	$80\cdot10^7$

Примечание. I и II – соответственно первая и вторая цифры индекса.

значной функцией главного параметра, в данном случае – номинальной силы $P_{\text{í}}$:

$$\text{Ï}_{ij} = \text{Ï}_j(P_{\text{í}\,i}), \qquad (2)$$

где Ï_{ij} – параметр; Ï_j – его функция; $P_{\text{í}\,i}$ – аргумент этой функции, равный номинальной силе i-го типоразмера гаммы. Другими словами, если в фундаментальной теории подобия параметры объекта образуют систему уравнений с определенной степенью свободы, то мы принимаем заведомо, что эта степень свободы равна единице.

Второе условие (условие равной надежности) заключается в том, что в полностью подобных машинах должны быть одинаковы все критериальные показатели соответствующих элементов конструкции: удельные силы, напряжения, температуры, коэффициенты износа, относительные деформации и т. д. Это условие, по существу, есть основной постулат общей теории подобия.

Третье условие – полное подобие всех типоразмеров кривошипных машин одной гаммы. Напомним, что полностью подобными называются системы, в которых соблюдается второе условие при геометрическом подобии их механической части. На самом деле, как будет показано ниже, совокупность кривошипных машин одной гаммы не является множеством полностью подобных систем. Но заведомое большинство их параметров соответствует соотношениям полного подобия. Вместе с тем, третье условие позволяет применить к подобным машинам принцип аксиоматики, а именно: хотя критериальных показателей может быть предложено как угодно много, независимыми для кривошипных машин являются четыре показателя. Остальные – производные от независимых. За независимые приняты [1] следующие соотношения:

$$\frac{\sigma_{1(i+1)}}{\sigma_{1i}} = 1; \quad \frac{\sigma_{2(i+1)}}{\sigma_{2i}} = 1; \quad \frac{\varphi_{\text{ò}(i+1)}}{\varphi_{\text{ò}i}} = 1; \quad \frac{K^{\text{ì}}_{\text{èç}(i+1)}}{K^{\text{ì}}_{\text{èç}i}} = 1, \qquad (3)$$

где σ_1 – приведенные максимальные напряжения в опасных сечениях главного вала при номинальной силе на ползуне и квазистатическом характере нагружения; σ_2 – приведенные максимальные напряжения в опасных сечениях станины при динамических нагрузках; $\varphi_{\text{ò}}$ – приведенный к главному валу угол торможения ведомых масс; $K^{\text{ì}}_{\text{èç}}$ – показатель износа муфты (удельная мощность трения при синхронизации ведомых и ведущих масс). Индекс i указывает на принадлежность параметра к спроектированному прессу, а индекс $(i+1)$ – к проектируемому прессу гаммы.

Вообще говоря, за независимые могут быть приняты другие параметры. Использование соотношений (3) применительно к кривошипным машинам оказалось наиболее удобным.

Четвертое условие – условие технологической равнозначности или технологического подобия. Пусть $T_i = \begin{pmatrix} s_i \\ P_i \end{pmatrix}$ – матрица i-го технологического процесса, а $T_{i+1} = \begin{pmatrix} s_{i+1} \\ P_{i+1} \end{pmatrix}$ – матрица $(i+1)$-го технологического процесса, где P и s – текущие значения собственно технологической силы и недохода пол-

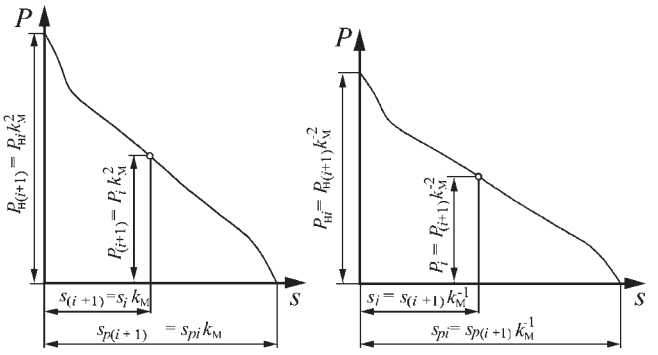


Рис. 1. Графики *P*(*s*) технологических процессов, удовлетворяющих условию (4)

зуна. Пусть $k_{\text{ì}} = \sqrt{\dfrac{P_{\text{í}(i+1)}}{P_{\text{í}i}}}$ – масштабный коэффициент (в данном случае номинальная сила $P_{\text{í}}$ рассматривается как наибольшая сила типового технологического процесса, т.е. как технологический параметр). Тогда условие технологического подобия в матричной форме записывается следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} &T_{i+1} = AT_i, \\ &\text{ãäå}\quad A = \begin{pmatrix} k_{\text{ì}} & 0 \\ 0 & k_{\text{ì}}^2 \end{pmatrix},\quad k_{\text{ì}} = \sqrt{\frac{P_{\text{í}(i+1)}}{P_{\text{í}i}}} \end{aligned}\right\}. \qquad (4)$$

Таким образом, в подобных технологических процессах график $P_{i+1}(s_{i+1})$ есть линейное отображение графика $P_i(s_i)$ (рис. 1) по следующим законам:

$$P_{i+1} = k_{\text{ì}}^2 P_i;\ s_{i+1} = k_{\text{ì}}\, s_i. \qquad (5)$$

Четвертое условие есть производное от второго и третьего, которое выделено в самостоятельное по двум соображениям. Во-первых, при всей его очевидности для процессов холодной штамповки, оно не очевидно для процессов горячей штамповки, где в лучшем случае может быть выражено как удобный интерполятивный прием, применимый для ограниченного диапазона изменения главных параметров в пределах одной гаммы кривошипных машин. Во-вторых, с помощью четвертого условия можно достаточно наглядно продемонстрировать правомочность постановки и решения задачи: в какой мере соотношения полного подобия позволяют, отталкиваясь от параметров типоразмера-представителя, определить параметры других типоразмеров проектируемой гаммы?

Соблюдение условий (2)–(4) приводит к соотношениям:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{a_{\text{âêë}\,(i+1)}}{a_{\text{âêë}\,i}} = \left(\sqrt{\frac{P_{\text{í}(i+1)}}{P_{\text{í}i}}}\right)^{-1}; \\
&\frac{\varphi_{i+1}}{\varphi_i} = \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} = \frac{K_{\text{èç}(i+1)}^{\text{ì}}}{K_{\text{èç}\,i}^{\text{ì}}} = \left(\sqrt{\frac{P_{\text{í}(i+1)}}{P_{\text{í}i}}}\right)^{0}; \\
&\frac{L_{i+1}}{L_i} = \frac{C_{i+1}}{C_i} = \frac{t_{i+1}}{t_i} = \left(\sqrt{\frac{P_{\text{í}(i+1)}}{P_{\text{í}i}}}\right)^{1}; \\
&\frac{N_{i+1}}{N_i} = \left(\sqrt{\frac{P_{\text{í}(i+1)}}{P_{\text{í}i}}}\right)^{2}; \\
&\frac{M_{i+1}}{M_i} = \frac{W_{i+1}}{W_i} = \frac{A_{i+1}}{A_i} = \frac{G_{i+1}}{G_i} = \left(\sqrt{\frac{P_{\text{í}(i+1)}}{P_{\text{í}i}}}\right)^{3}; \\
&\frac{I_{i+1}}{I_i} = \left(\sqrt{\frac{P_{\text{í}(i+1)}}{P_{\text{í}i}}}\right)^{5}.
\end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

В выражениях (6) индексы i и $(i+1)$ означают принадлежность двух сравниваемых одноименных параметров к двум различным прессам одной гаммы: ω_{i+1} и ω_i – угловые скорости одноименных звеньев; n_{i+1} и n_i – частоты непрерывных ходов; $a_{\text{âêë}(i+1)}$ и $a_{\text{âêë}i}$ – максимальная частота включений муфты на одиночных ходах; φ_{i+1} и φ_i – одноименные угловые параметры, например, приведенные к главному валу углы торможения, расчетные углы, углы поворота кривошипа, соответствующие началу или концу штамповки, и т.д.; σ_{i+1} и σ_i – сравниваемые одноименные напряжения и удельные силы; $K_{\text{èç}}^{\text{ì}}$ – показатели износа муфты и тормоза; L – одноименные линейные параметры: номинальный недоход, полный ход ползуна, закрытая высота, радиус кривошипа, линейные размеры конструктивных элементов и т.д.; C – линейные жесткости сравниваемых элементов и прессов в целом; t – параметры с размерностью времени: продолжительность циклов непрерывного или одиночного хода, продолжительность какого-либо процесса (разгона или остановки ведомых масс, штамповки и т.д.); N – мощность какого-либо процесса, ряда процессов, пресса в целом; M – момент сил, в том числе расчетный крутящий момент на главном валу, момент сцепления муфты или тормоза и пр.; W – кинетическая энергия звена или группы звеньев; A – затраченная работа: идеальная, трения, общая за цикл и пр.; G – масса или гравитационная сила эле-

мента или группы элементов; I – момент инерции или приведенный момент инерции звена или группы звеньев.

Суть выражений (6): в двух прессах одной и той же гаммы, но разной номинальной силы, удовлетворяющих условиям (2)–(4), величины соответствующих друг другу одноименных параметров относятся как корни квадратные из отношения номинальных сил этих прессов, возведенные в целую отрицательную, нулевую или положительную степень, величина которой определяется размерностью сравниваемых параметров.

То же самое выражается через масштабный коэффициент в форме:

$$\text{Ï}_{(i+1)j} / \text{Ï}_{ij} = k_{\text{ì}}^{c}, \qquad (7)$$

где $\text{Ï}_{(i+1)j}$ и Ï_{ij} – сравниваемые одноименные параметры $(i+1)$-го и i-го прессов гаммы; "c" – показатель степени масштабного коэффициента, определяемый размерностью сравниваемых параметров.

Кривошипные машины, удовлетворяющие соотношениям (6), или, что то же самое, соотношению (7) и табл. 2, считаются полностью подобными. Они теоретически равнонадежны и геометрически подобны, хотя типовые графики их технологических операций не подобны геометрически (геометрически подобны в теории сами типовые изделия).

Полностью подобные прессы не обязательно должны быть оптимальными. Но если хотя бы один пресс гаммы соответствует оптимуму по какой-либо целевой функции, то остальные типоразмеры прессов этой гаммы, удовлетворяющие условиям полного подобия, также соответствуют оптимуму по этой целевой функции.

2. Зависимость показателя степени масштабного коэффициента от размерности сравниваемых параметров

c	Размерность
–1	1/время: частоты, угловая скорость и т.п.
0	Безразмерные и критериальные параметры: сила/площадь, мощность/площадь, угол, температура
1	Длина, сила/длина, время
2	Сила технологическая, инерционная и любая другая, кроме гравитационной, мощность
3	Момент силы любой, кроме гравитационной, энергия, работа, масса, гравитационная сила (вес)
5	Момент инерции (масса×длина^2)

Для практического применения приведенных соотношений необходимо ответить на вопрос: в какой мере реальные кривошипные машины одной гаммы, но разных типоразмеров могут быть выполнены полностью подобными? Ответ таков. Большинство параметров указанных машин должно отвечать условиям полного подобия. Исключение составляют четыре группы параметров. Первая группа – параметры, зависящие от эргономики, точнее – от антропологических характеристик человека. Вторая – параметры устройств гравитационного уравновешивания подвижных масс вертикальных прессов. Третья – параметры, зависящие от частоты вращения ротора главного электродвигателя и передаточных отношений ступеней передач главного привода. Четвертая – параметры общих вспомогательных устройств кривошипных машин: систем управления и смазки.

Наиболее характерный пример параметров первой группы – расстояние от стола до пола вертикальных прессов, определяемое требованиями расположения плоскости разъема штампов по наиболее удобной высоте (~0,8 м от уровня пола), независимо от типоразмера машины. Способы учета этого обстоятельства достаточно просты и очевидны.

В геометрически подобных прессах отношение масс подвижных элементов ИМ пропорционально кубу модуля подобия, а сила пневматического уравновешивания – только квадрату. Поэтому параметры гравитационных уравновешивателей необходимо выбирать исходя из массы вертикально-поступательно движущихся элементов ИМ, т.е. из величины гравитационной силы, а не из геометрического подобия сравниваемых прессов.

Наиболее существенны отклонения от соотношений подобия третьей группы параметров. Строго говоря, чтобы каждый тип электродвигателя удовлетворял условиям (6) полного подобия хотя бы в пределах той гаммы, для которой он подобран, необходимо, чтобы его номинальная мощность, частота вращения ротора, механическая и тепловая характеристики также удовлетворяли указанным условиям. Гаммы кривошипных машин могут выпускаться в большом диапазоне изменения величин одноименных параметров. Например, универсальные КГШП выпускаются в диапазоне $3{,}15 \le P_{\text{í}} \le$ ≤ 160 МН. Таким образом, параметр $P_{\text{í}}$ в случае выпуска гаммы, охватывающей весь указанный диапазон, должен изменяться в $160/3{,}15 \approx 50$ раз. Среднестатистический диапазон выпуска кривошипных машин одной гаммы, по нашей оценке, соответст-

вует примерно 10-кратному изменению главного параметра.

При промышленной частоте тока 50 Гц частота вращения вектора поля статора подавляющего большинства пригодных для использования в кривошипных машинах асинхронных двигателей составляет 1000 или 1500 мин$^{-1}$. Частота 3000 мин$^{-1}$ применяется редко, так как требует слишком большого редуцирования, а потому не выгодна. Частота ≤750 мин$^{-1}$ не экономична из-за низкого КПД, больших габаритов двигателя и высокой стоимоти.

По приведенным соображениям, хотя ряд других, не менее весомых, опущен, не все параметры главного привода удается подобрать на основе соотношений полного подобия.

Выбор параметров главного привода (ГП) и системы включения (СВ) при проектировании по прессу-представителю происходит по следующему алгоритму.

Первый шаг – определение всех параметров ГП и СВ проектируемого пресса на основе соотношений полного подобия. При этом основными параметрами, которые желательно оставить неизменными в процессе последующего проектирования, являются: мощность главного электродвигателя, частоты непрерывных и единичных ходов ползуна, кинетическая энергия холостого вращения ведущих масс, приведенные к главному валу моменты сцепления муфты и тормоза, приведенный к главному валу момент инерции ведомых масс. Кроме того, желательно выбирать для всех типоразмеров машин одной гаммы главные электродвигатели одной серии, чтобы величины критических скольжений их роторов существенно не отличались друг от друга.

Второй шаг – подбор каталожного главного электродвигателя на основе первого шага и базы данных по существующим электродвигателям.

Третий шаг – определение кинематики главного привода: разбивка его на ступени и определение передаточных отношений. Исходными параметрами служат: частота непрерывных ходов ползуна (оборотов кривошипа), определяемая на основе условий полного подобия, и частота вращения ротора, определяемая на втором шаге.

Четвертый шаг – определение параметров СВ. Если муфта и тормоз расположены на главном валу или на валу, связанном с главным тем же передаточным отношением, которое предусмотрено первым шагом, то все параметры СВ определяют на основе условий полного подобия. В противном случае каждый линейный размер L муфты находят по зависимости:

$$L = L_{\text{ïîä}} \sqrt[3]{U_{\text{ïîä}} / U}, \qquad (8)$$

где $L_{\text{ïîä}}$ и $U_{\text{ïîä}}$ – линейный размер и передаточное отношение от вала муфты к главному валу, соответственно, определенные на первом шаге; U – передаточное отношение от вала муфты к главному валу, определенное на третьем шаге. При этом момент сцепления муфты $M_{\text{ñö}}^{\text{ì}}$ будет определяться соотношением

$$M_{\text{ñö}}^{\text{ì}} = M_{\text{ñö.}\ \text{ïîä}}^{\text{ì}} U / U_{\text{ïîä}},$$

где $M_{\text{ñö.}\ \text{ïîä}}^{\text{ì}}$ – момент сцепления, определенный на первом шаге, т.е. исходя из соотношений полного подобия. Приведенный момент инерции ведомых масс и момент сцепления тормоза не будут в этом случае отвечать соотношениям полного подобия, то же самое касается показателей износа муфты и тормоза.

Пятый шаг – определение механических (линейных и прочностных) параметров ГП. Параметры ступеней, передаточные отношения которых к главному валу остались теми же, что у пресса-представителя, отвечают условиям полного подобия, т.е. определены первым шагом.

Шестой шаг – определение момента инерции маховика. Исходными параметрами являются: величина запасенной энергии ведущих масс, практически равная величине запасенной энергии маховика, определенной по условию полного подобия, а также частота вращения вала маховика, определенная на третьем шаге.

На этом этап выбора параметров нулевого приближения можно считать законченным. Далее идет проверка главного двигателя на предмет обеспечения механической и тепловой устойчивости [1] и (или), при необходимости, оптимизация по тем или иным целевым функциям. Работа системы включения отвечает условиям полного подобия в той мере, в какой это оговорено выше (см. четвертый шаг). Время цикла на холостых и одиночных ходах должно удовлетворять условиям полного подобия по определению.

Устройства, входящие в системы смазки и управления, закладываются в проект как покупные изделия на основе имеющегося опыта проектирования. Их параметры в большинстве случаев не являются расчетными. Исключение составляют пневмораспределители СВ, которые формально долж-

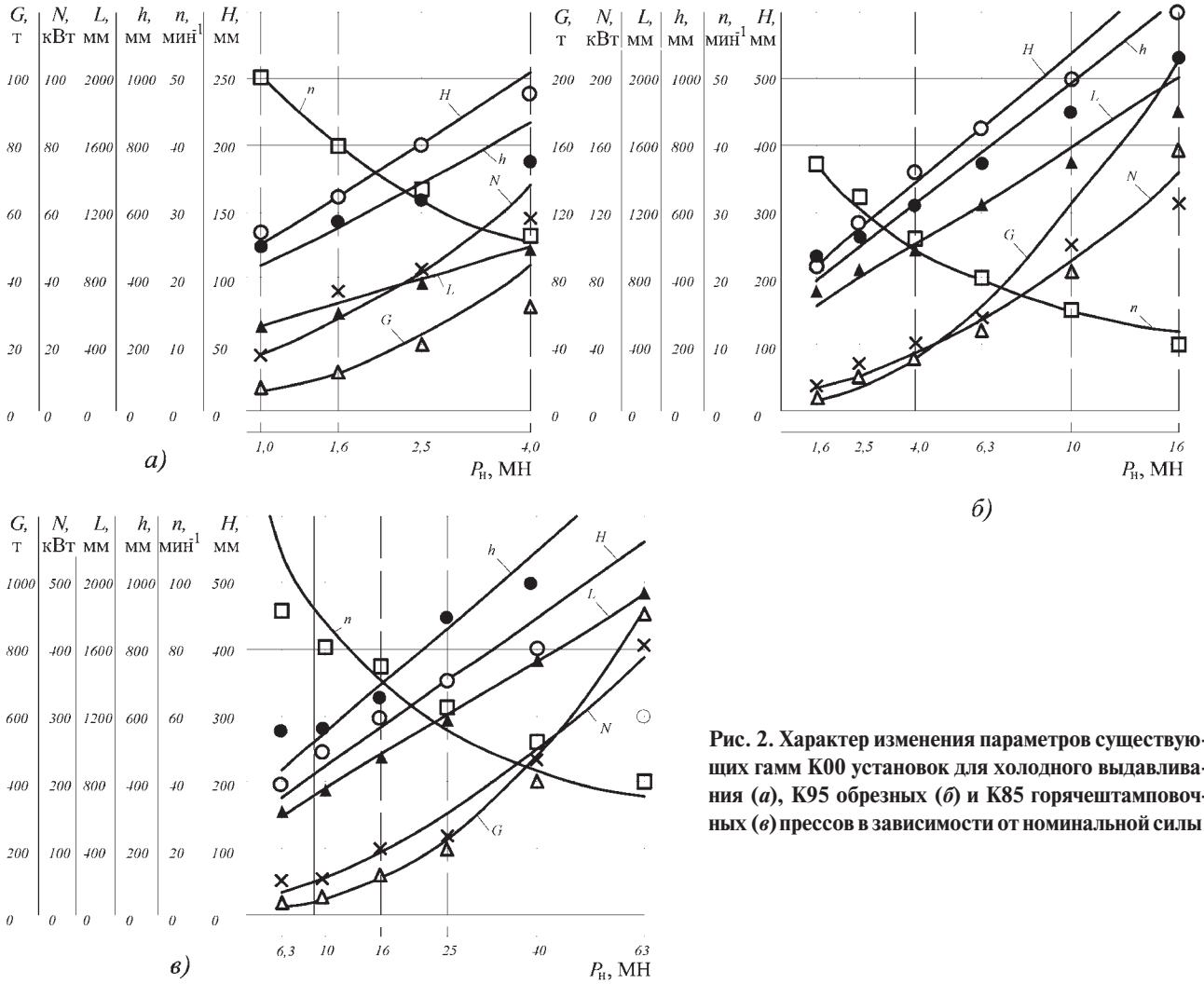


Рис. 2. Характер изменения параметров существующих гамм К00 установок для холодного выдавливания (*а*), К95 обрезных (*б*) и К85 горячештамповочных (*в*) прессов в зависимости от номинальной силы

ны отвечать соотношениям подобия, поскольку кроме логических функций они обеспечивают динамику процессов разгона и торможения ведомых масс [1]. Но в случае выпуска их единой гаммой на все множество выпускаемых и эксплуатируемых кривошипных машин достаточно четырех типоразмеров. Например, распределитель У7124А с условным проходом 25 мм в состоянии обеспечить работу главных муфт и тормозов листоштамповочных прессов силой от 1 до 10 МН, т.е. большинства кривошипных машин, поскольку он обладает соответствующим запасом динамических и силовых характеристик. Поэтому подбор распределителей, так же как и сечений трубопроводов и объемов ресиверов, вообще говоря, подчиняющихся соотношением подобия, ведется на основе известных статистических соотношений, практически не вызывая затруднений.

Предложенная методика применима ко всем кривошипным штамповочным машинам и к другим механическим прессам. На рис. 2 показан характер изменения параметров существующих гамм К00 для холодного выдавливания (*а*), К95 обрезных (*б*) и К85 горячештамповочных (*в*) в зависимости от номинального усилия $P_{\text{ї}}$. На рис. 3 показан характер изменения кинетической энергии маховых масс КГШП Эджекс моделей 10С, 16С и 20С, а также КГШП Нейшенел № 4, 6А, 71/2. На рис. 2, 3 на теоретические линии, удовлетворяющие соотношениям полного подобия, наложены значения параметров реальных прессов (G – масса пресса, N – установленная мощность электродвигателя, L – габаритная высота, h – закрытая высота, n – число непрерывных ходов в минуту, H – полный ход, W – кинетическая энергия маховых масс).

Экспериментальная проверка условий технологического подобия процессов (4) велась для процессов горячей и холодной объемной штамповки. Расчеты велись в программном комплексе QForm, решающим 2- и 3-мерные задачи нестационарного

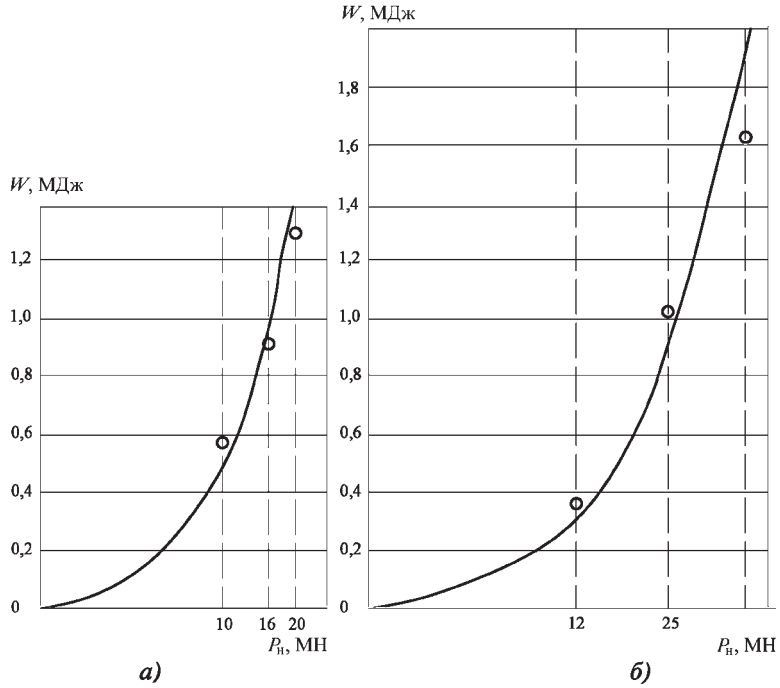


Рис. 3. Характер изменения кинетической энергии маховых масс КГШП Эджекс моделей 10С, 16С и 20С (*а*), а также КГШП Нейшенел моделей № 4, 6А, 71/2 (*б*) в зависимости от номинальной силы

неизотермического вязкопластического формоизменения металла при объемной деформации методом конечно-элементной аппроксимации исходных систем уравнений.

На рис. 4, 5 приведены результаты расчета процессов горячей объемной штамповки (ГОШ) поковок грузового автомобиля в открытых штампах. Кривые *1* соответствуют ГОШ реальных поковок на КГШП силой 25 МН. Кривые *2* представляют собой технологическое подобие кривых *1* для КГШП силой 63 МН и получены по формулам (4). Кривые *3* соответствуют ГОШ поковок, размеры которых пропорционально увеличены на величину $\sqrt{63/25} = 1{,}587$.

На рис. 6 приведены результаты расчета процесса ГОШ поковки шестерни в закрытом штампе. Кривая *1* соответствует ГОШ реальной поковки на КГШП силой 31,5 МН. Кривая *2* представляет собой технологическое подобие кривой *1* для КГШП силой 6,3 МН и получена по формулам (4). Кривая *3* соответствует ГОШ шестерни, размеры которой пропорционально уменьшены на величину $\sqrt{31{,}5/6{,}3} = 2{,}24$.

На рис. 7, 8 приведены результаты расчета процессов ГОШ диска и ХОШ болта, соответственно, в открытых штампах. Кривые *1* соответствуют процессам штамповки реальных поковок на КГШП силой 6,3 МН. Кривые *2* представляют собой технологическое подобие кривых 1 для пресса силой 25 МН и получены по формулам (4). Кривые *3* – расчетные графики штамповки поковок, размеры которых пропорционально увеличены на величину $\sqrt{25/6{,}3} = 1{,}99$.

Другими словами, кривые *1* и *3* во всех случаях получены путем моделирования процессов объем-

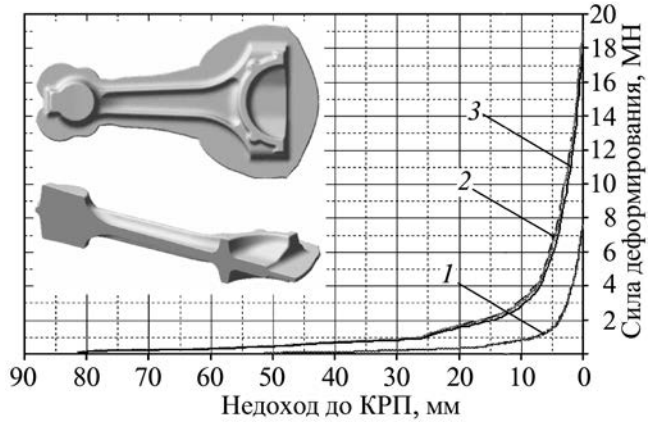


Рис. 4. Зависимости сила–ход для процесса ГОШ поковки шатуна из стали 45:
1 – реальной поковки на прессе силой 25 МН; *2* – пересчитанные по формуле (4) для пресса силой 63 МН; *3* – шатуна, размеры которого увеличены с коэффициентом подобия 1,587

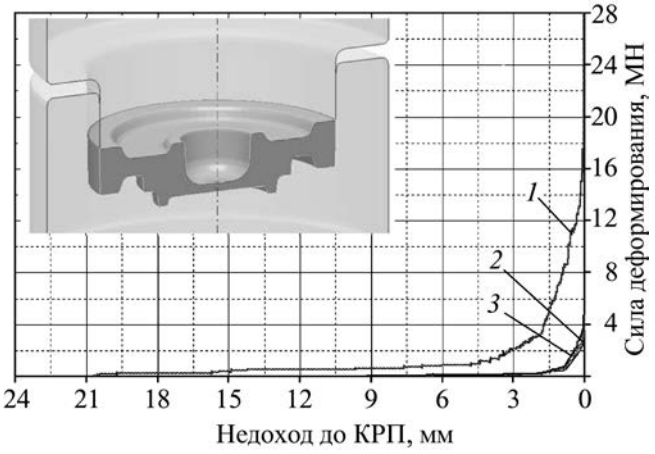


Рис. 5. Зависимости сила–ход для процесса ГОШ поковки ступицы из стали 45:
1 – реальной поковки на прессе силой 25 МН; *2* – пересчитанные по формуле (4) для пресса силой 63 МН; *3* – диска, размеры которого увеличены с коэффициентом подобия 1,587

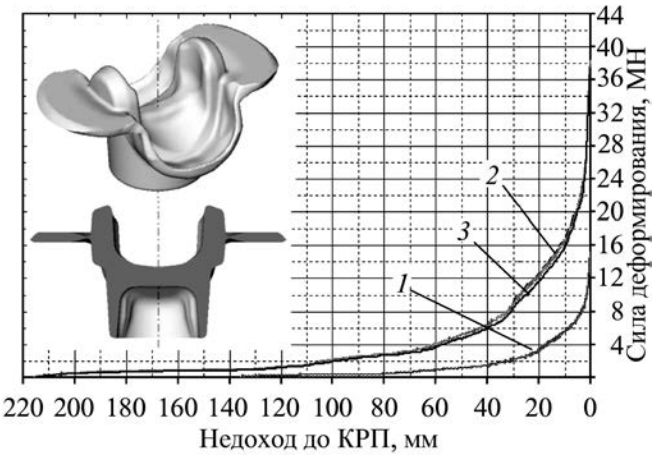


Рис. 6. Зависимости сила–ход для процесса ГОШ поковки шестерни из стали 18ХГ в закрытом штампе:
1 – реальной поковки на прессе силой 31,5 МН; *2* – пересчитанные по формуле (4) для пресса силой 6,3 МН; *3* – шестерни, размеры которой уменьшены с коэффициентом подобия 2,24

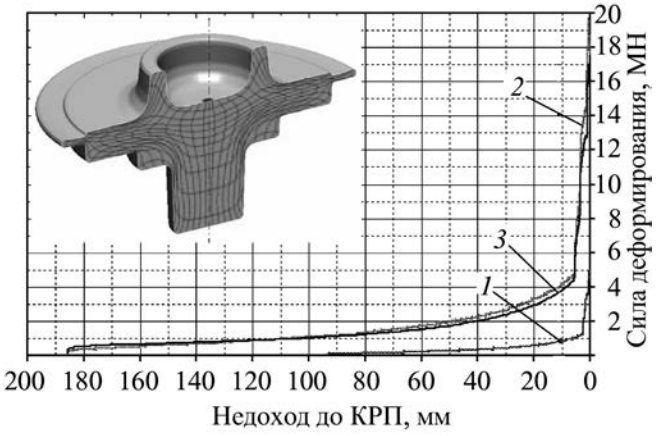


Рис. 7. Зависимости сила–ход для процесса ГОШ поковки диска из стали 35ХМ:
1 – реальной поковки на прессе силой 6,3 МН; *2* – пересчитанные по формуле (4) для пресса силой 25 МН; *3* – диска, размеры которого увеличены с коэффициентом подобия 1,587

ной штамповки в QForm, кривые *2* – пересчетом кривых *1* по соотношениям технологического подобия (4). Влияющие на технологический процесс

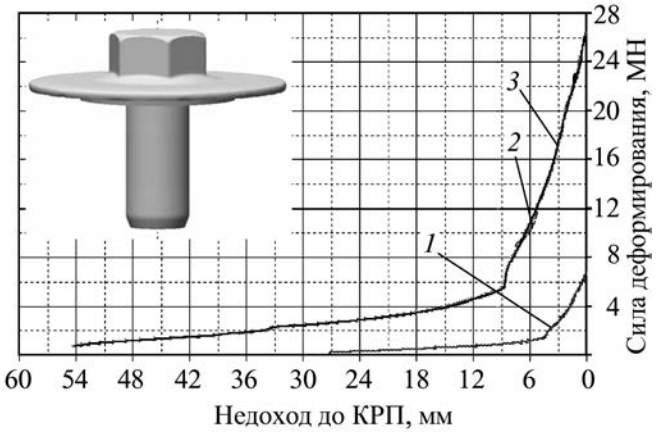


Рис. 8. Зависимости сила–ход для процесса ХОШ поковки болта из стали 34Х:
1 – реальной поковки на прессе силой 6,3 МН; *2* – пересчитанные по формулам (4) для пресса силой 25 МН; *3* – болта, размеры которого увеличены с коэффициентом подобия 1,99

параметры прессов во всех случаях пересчитаны по соотношениям табл. 2.

Вывод

Предложенная методика применима для всех кривошипных машин, сокращая затраты и время их проектирования (при условии уже спроектированного пресса-представителя гаммы). Не менее важная роль соотношений подобия – возможность распространения результатов натурного или численного экспериментов, полученных на одном прессе, на прессы всей гаммы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Свистунов В.Е.** Кузнечно-штамповочное оборудование. Кривошипные прессы: учебное пособие. М.: МГИУ, 2008. 698 с.

Владимир Ефимович Свистунов, канд. техн. наук;
Владимир Анатольевич Чубуков, канд. техн. наук;
Алексей Григорьевич Матвеев, ассистент;
Артур Александрович Гартвич, инженер

УДК 669.295.5′24

И.А. Бурлаков *("НИИД", ФГУП ММПП "Салют")*

Способы получения заготовок из сплава ЭП742 с мелкозернистой структурой для последующей изотермической раскатки

Рассмотрены методы получения заготовок типа дисков газотурбинных двигателей формообразованием локальной деформирующей нагрузкой. Обоснована необходимость наличия мелкокристаллической структуры в заготовках для последующей изотермической раскатки из жаропрочных никелевых сплавов. Приведены результаты термомеханической обработки заготовок, обеспечивающей получение требуемой мелкозернистой структуры.

The jet engine disk forming methods by local deforming load and results of the thermal and plastic deformation which provides the required fine-grain structure are presented. The presence of fine-grain structure of the performs made of nickel-based alloy for the isothermal rolling is proved.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; диск; жаропрочный сплав; мелкокристаллическая структура; изотермическая раскатка.

Keywords: jet engin; disk; heat-resistant alloy; fine-grained structure; isothermal rolling.

Авиационное двигателестроение является крупным потребителем дорогостоящих сплавов и, в первую очередь, жаропрочных титановых и никелевых, затраты на которые достигают 60 % стоимости готового изделия. В общей массе используемого металла штамповки и кольцевые заготовки составляют 50...55 %, а их коэффициент использования металла (КИМ) – 0,08...0,25. Диски газотурбинных двигателей (ГТД) являются наиболее массивными и трудоемкими деталями ГТД, и их токарная обработка достигает 20...25 % общей трудоемкости изготовления двигателя.

Снижение объема механической обработки требует разработки и внедрения новых процессов пластического формообразования, позволяющих уменьшить припуски и повысить КИМ. Такими методами являются:

- изотермическая штамповка;
- методы локальной деформации;
- порошковая металлургия;
- жидкофазное спекание с последующей изотермической раскаткой.

Технология объемной штамповки в условиях сверхпластичности находит все большее применение при производстве деталей ответственного назначения – лопаток и дисков роторной части ГТД, а также различных корпусных деталей со сложными формами.

В то же время разработка и внедрение новых технологических процессов локального формообразования (раскатки, ротационной вытяжки) в режиме сверхпластичности жаропрочных сплавов на основе титана и никеля предполагает применение объемной штамповки в изотермических и квазиизотермических условиях в качестве предварительной формообразующей операции для получения относительно простых по форме и с меньшими размерами исходных заготовок. Из таких заготовок в дальнейшем методами локального формообразования изготовляются сложнопрофильные детали.

Следует отметить, что технология локального формообразования наиболее эффективна при изготовлении заготовок осесимметричных деталей типа дисков больших диаметров 560...800 мм. Однако при изготовлении дисков небольших диаметров и относительно простой конфигурации не более 560 мм технология изотермической раскатки может оказаться экономически целесообразней. Это во многом объясняется тем, что по техническим условиям на деталях типа дисков предусмотрены значительные припуски даже в предварительно механически обработанном состоянии (для оценки качества диска неразрушающими методами контроля: ультразвуковой контроль (УЗК), цветная дефектоскопия и др.). Поэтому не всегда в полной мере

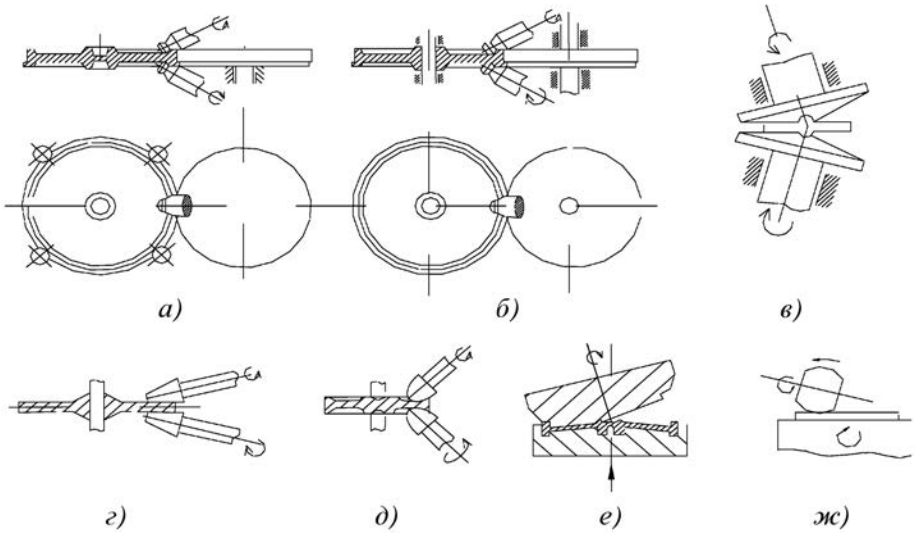


Рис. 1. Возможные схемы раскатки

можно реализовать преимущества локального изотермического формообразования.

Методам формообразования деталей, в том числе типа дисков и валов, посвящено много работ. Данные методы по сравнению с традиционными обладают такими преимуществами, как возможность снизить деформирующую силу, повысить точность получаемых заготовок и снизить объем механической обработки за счет сокращения припусков. В основе данных методов лежит последовательное формообразование отдельных частей заготовки локальными нагрузками, обеспечивающими управляемое течение металла.

Впервые в промышленности широкое распространение метод раскатки изделий типа дисков без подготовки структуры исходных заготовок получил для изготовления железнодорожных колес, при реализации которого заготовка приобретает форму путем ее обжатия раскатными роликами. Возможные схемы раскатки приведены на рис. 1 (Маскулия Е.Р., Альщиц М.Я., Грайфер А.Х. Изготовление деталей типа дисков методом раскатки // Вестник машиностроения. 1983. № 7. С. 65–67).

Анализ методов получения заготовок с локальным приложением деформирующей нагрузки показывает, что основное применение они получили для изготовления железнодорожных колес. Первоначально диски ГТД использовали для формообразования отдельных элементов.

Основной причиной, сдерживающей внедрение данных методов получения заготовок дисков ГТД, является неэффективность применения технологии раскатки железнодорожных колес вследствие особенностей конструкции дисков и низких технологических свойств их сплавов.

Усилиями ряда предприятий авиационной промышленности была разработана технология изотермической раскатки, для реализации которой были созданы дискораскатной стан СРД-800 и позднее, по результатам выполненных на нем научно-исследовательских работ, – промышленная автоматизированная линия АЛРД-800.

В настоящее время сортамент изделий, изготовляемых данным методом, существенно расширился [1–6]. Интерес к использованию таких технологий проявляется различными двигателестроительными фирмами в нашей стране и за рубежом. Привлекает то, что локальные методы формообразования в изотермических условиях позволяют расширить технические возможности и увеличить коммерческую выгоду от произведенной таким образом продукции. Так, по сравнению с объемной штамповкой сила деформации в этом случае снижается до 1000 раз.

Становится доступным получение не только тонкостенных деталей типа дисков, оболочек, но и массивных изделий с комбинированными сложными для штамповки формами. При этом число операций и переходов сводится до минимума. В результате снижается не только трудоемкость их производства, но и в значительной мере потеря металла. Коэффициент использования металла при использовании методов локального формообразования заготовок деталей достигает значения до 0,4, что существенно выше, чем при использовании традиционных формообразующих операций штамповки.

Для раскатки в условиях сверхпластичности необходимы заготовки с мелкокристаллической структурой. Наличие мелкокристаллической структуры в жаропрочных сплавах позволяет:

• существенно повысить пластические и снизить прочностные свойства данных сплавов при обработке металлов давлением;

• обеспечить деталям однородность структуры и требуемых механических свойств. Важно, чтобы скорость деформации не приводила к повышению температуры горячей деформации заготовки до

значений, при которых рост зерен становится существенным. Для большинства процессов объемной деформации таковыми являются скорости, соответствующие скорости пластической деформации (СПД), т.е. $10^{-2}...10^{-4}$ $с^{-1}$. При локальных методах формообразования допустимы большие скорости $10^{-1}...100$ $с^{-1}$, вследствие ограниченного объема очага деформации и периодического характера воздействия на него инструмента;

• существенно улучшить качество УЗК. Известно, что в жаропрочных сплавах с мелкозернистой структурой характерные изменения линейных размеров ее составляющих не вызывают заметных изменений акустических характеристик при УЗК. В крупнозернистых сплавах неоднородности пластинчатой структуры существенно повышают уровень шумов и снижают чувствительность УЗК. По данным [7, 8], рост зерен от 20 до 150 мкм в зависимости от применяемого типа преобразователей и частоты звука снижает чувствительность УЗК в 2–6 раз.

Таким образом, УЗК деталей с микрокристаллической структурой повышает вероятность выявления не пригодных для эксплуатации деталей дефектов и, следовательно, повышает надежность газотурбинных двигателей комплектации его качественными компонентами;

• наличие микрокристаллической структуры в жаропрочных сплавах позволяет иначе использовать возможности их термообработки для получения изделий с повышенными характеристиками качества. Для никелевых сплавов изменение свойств от жаропрочных к сверхпластическим и наоборот связано с необходимостью прямой и обратной инверсий размеров зерен от крупных к мелким и наоборот.

Измельчение зерен достигается деформацией, а укрупнение – термообработкой. Поскольку изделия из жаропрочных никелевых сплавов могут эксплуатироваться в достаточно широком температурном интервале, то каждому характерному уровню температуры эксплуатации наилучший комплекс механических свойств обеспечивает структура с определенным размером зерен. Термообработка жаропрочных сплавов, как известно, способна увеличить размер зерен, но не позволяет его уменьшить. Поэтому, чем меньше исходный размер зерен в детали, тем больше возможностей обеспечить ей в результате регламентированного роста зерен при термообработке наилучший комплекс механических свойств для заданных условий эксплуатации.

Важным фактором при термообработке детали, изготовленной в условиях сверхпластической деформации, является относительно равномерный рост зерен, обусловленный отсутствием наклепа и анизотропии структуры, что позволяет соответственно получать также и изделие с однородной крупнозернистой структурой и изотропными механическими свойствами.

Переработка крупнозернистых полуфабрикатов в мелкозернистые требует определенных материальных, энергетических и финансовых затрат. Однако эти издержки компенсируются более экономичным расходом материала и повышением их качества при изотермической раскатке. Это позволяет также снизить массу исходных заготовок, увеличить выход годного материала из слитка, расширить технологические рамки их применения в качестве альтернативы более дорогим порошковым сплавам.

В качестве исходных заготовок для последующей изотермической раскатки могут быть использованы заготовки в виде плоских шайб и профилированные, как с крупнозернистой структурой, так со специально подготовленной мелкозернистой структурой. При изотермической раскатке заготовок из никелевых сплавов типа ЭП742 подготовка мелкозернистой структуры является обязательной вследствие существенного снижения силы формообразования и износа раскатных роликов.

В целях получения исходных данных для уточнения параметров опытного технологического процесса осадки заготовок диаметром 210...400 мм из сплава ЭП742 был выполнен комплекс работ, который позволил оценить удельные силы. Кроме того, были получены исходные данные для расчета полной силы осадки заготовок, допустимые степени деформации по переходам осадки и число переходов осадки. Одновременно были определены параметры термомеханической обработки на формирование мелкозернистой структуры.

В качестве исходного материала для проведения работ использовали фрагмент серийного штампованного диска из сплава ЭП742 (таблица.).

Образцы, вырезанные из фрагмента серийного штампованного диска, имели крупнозернистую микроструктуру со средним размером зерен 80...120 мкм (рис. 2).

Химический состав сплава ЭП742, % мас.

Fe	Cr	Ti	Co	W	Mo	Nb	Al	Ni
0,68	13,32	2,37	9,71	–	3,14	1,41	1,68	Основа

Рис. 2. Микроструктура исходного состояния сплава ЭП742. ×500

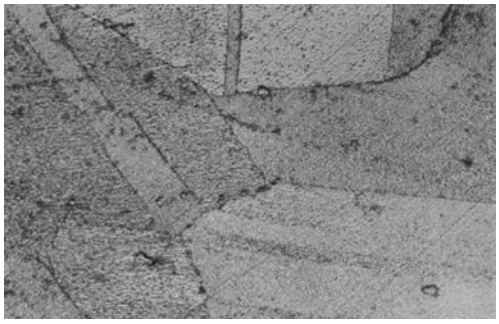


Рис. 3. Микроструктура сплава ЭП742 после отжига по режиму: (1158±3) °С, 1 ч; (1122±4) °С, 2,5 ч; охлаждение с печью до 900 °С; охлаждение на воздухе. ×500

В состоянии поставки (горячепрессованный пруток диаметром 210 мм) сплав ЭП742 имеет крупнозернистую микроструктуру с размером зерен около 100...150 мкм. Поэтому для обеспечения структурного состояния, идентичного горячепрессованному прутку, образцы и заготовки, вырезанные из серийного штампованного диска, подвергали отжигу при температурах (1158±3) °С, 1 ч; (1122±4) °С, 2,5 ч.

Микроструктура сплава ЭП742 после отжига приведена на рис. 3.

Формирование мелкозернистой структуры в образцах высотой 18 мм проводили путем дробной осадки со степенью деформации $\varepsilon \approx 40$ % на каждом этапе в сочетании с последующими последеформационными отжигами.

Режимы термомеханической обработки образцов. Формообразование было осуществлено тремя осадками.

Осадка I: нагрев до 1070 °С, 20 мин, осадка с $\varepsilon \approx 40$ %, последеформационный отжиг при 1050 °С, 2,5 ч, при котором реализуется динамическая рекристаллизация, охлаждение с печью до 900 °С, далее на воздухе.

Осадка II: нагрев до 1050 °С, 20 мин, осадка с $\varepsilon \approx 40$ %, последеформационный отжиг при 1030 °С, 2,5 ч, охлаждение с печью до 900 °С, далее на воздухе.

Осадка III: нагрев до 1030 °С, 20 мин, осадка с $\varepsilon \approx 40$ %, последеформационный отжиг при температуре 1030 °С, 2,5 ч, охлаждение с печью до 900 °С, далее на воздухе.

Микроструктура образцов после трех осадок и последующих отжигов представлена на рис. 4.

Температура нагрева штампа "плоские бойки" на всех этапах осадки составляла 540...560 °С.

Опробованный режим термомеханической обработки образцов обеспечивает практически 100 %-ную рекристаллизацию и формирование мелкозернистой структуры с размером зерен менее 10 мкм (рис. 4, *б*).

Для оценки удельных сил деформирования была проведена осадка заготовок ∅ 30×60 мм. Перед осадкой заготовки покрывали стеклоэмалью ЭВТ-10, теплоизолировали стекло- и асбестотканью и упаковывали в контейнеры из стали 12Х18Н10Т.

Внешний вид заготовок и контейнера перед осадкой приведен на рис. 5. Заготовки осаживали за три перехода в соответствии с термомеханическими режимами осадки образцов.

После термомеханической обработки по режиму: гетерогенизация (1153±4) °С, 1 ч, охлаждение с

а) *б)* *в)*

Рис. 4. Микроструктура образца после осадки I (*а*), II (*б*), III (*в*) и последующего отжига. ×500

Рис. 5. Заготовка и контейнер перед осадкой

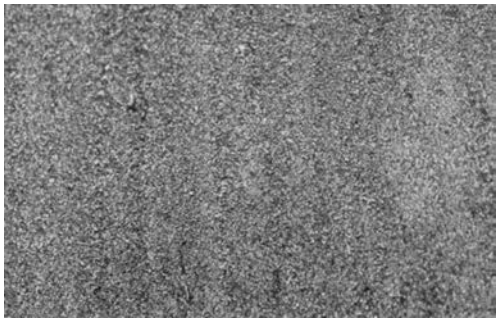


Рис. 6. Микроструктура заготовки (исходный размер ∅ 30×60 мм) после четырехступенчатой осадки и отжигов. ×500

печью до 1120 °С, 2,5 ч; охлаждение с печью до 1070 °С, осадка $\varepsilon \approx 40$ %; отжиг 1050 °С, 2,5 ч, осадка $\varepsilon \approx 40$ %; отжиг 1030 °С, 2,5 ч, осадка $\varepsilon \approx 20$ %, отжиг при 1030 °С, осадка $\varepsilon \approx 20$ %, отжиг при 1030 °С в заготовке формируется ультрамелкозернистая структура с размером микрозерна менее 10 мкм (рис. 6).

Удельные силы при осадке на четвертом переходе составили около 180...220 МПа. Полная сила пресса в конце четвертой осадки не превышала 120 кН.

Данные режимы были использованы для получения мелкозернистой структуры в заготовках для их последующей раскатки в изотермических условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З.** Изготовление сложно-профильных деталей раскаткой в условиях сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство. 1999. № 4. С. 32–36.

2. **Утяшев Ф.З., Баймурзин Р.Г., Плехов В.А.** Раскатка колец из высокожаропрочных никелевых сплавов в условиях сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство. 1999. № 7. С. 14–16.

3. **Изотермическая** ротационная вытяжка заготовок валов ГТД из стали 1Х12Н2МВФА5Ш / А.В. Логунов, В.А. Плехов, И.А. Бурлаков, В.А. Зимин // Авиационная промышленность. 1990. № 7. С. 33–36.

4. **Утяшев Ф.З., Трифонов В.Г., Михайлов С.И.** Раскатка дисков автомобильных колес из алюминиевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. 1999. № 4. С. 36–38.

5. **Nieh T.G., Wadworrth J.** Superplastisity and Superplastic Forming of Ceramics // Proc. ICSAM-1994. Moscow. 1994. P. 359–368.

6. **Утяшев Ф.З.** Локальное формообразование деталей в условиях сверхпластичности: тр. междунар. конф. "Современное состояние теории и практики сверхпластичности материалов", Уфа 21–23 ноября. 2001. С. 75–83.

7. **M.F.X. Giliotti, B.P. Bewlay, O.A. Kaibyshev, F.Z. Utyashev** / Proceedings 9-th World Conference Titanium, June 7–11, 1999, St. Peterburg.

8. **Исаев А.А., Кузенкова В.П.** Взаимосвязь акустических и структурных параметров при ультразвуковом контроле заготовок из титановых и никелевых сплавов // ТЛС. 1993. № 4–5. С. 91–97.

Игорь Андреевич Бурлаков, канд. техн. наук

УДК 669.699

А.С. Матвеев, В.Н. Гадалов, К.А. Крючков, С.Б. Григорьев, А.Е. Мелихов
(Курский государственный технический университет, ООО «Астраханьгазпром», Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Технологические решения при изготовлении слоистых металлических материалов

Рассмотрены особенности технологии производства многослойных материалов сэндвич-типа плакированием. Описана модель, позволяющая рассчитать прочность сцепления на сдвиг составляющих биметаллического материала, полученного в процессе совместной пластической деформации.

In the presented work are considered features of the obtaining techniques of sandwich-type multilayered materials. Also it's described the model which allows us to evaluate durability of coupling on components shift of the bimetallic material, which was received in the course of joint plastic deformation.

Ключевые слова: плакирование; материалы сэндвич-типа; сдвиг составляющих биметаллического материала; слоистые металлические материалы.

Keywords: cladding; sandwich-type materials; components shift of the bimetallic material; layered metallic materials.

Ранее в работах [1 – 3] была показана актуальность применения новой экологически безопасной технологии производства многослойных материалов сэндвич-типа, которая заключается в нанесении металлических покрытий при помощи плакирования.

Анализ основных технологических процессов плакирования в твердом состоянии показал, что разрушение поверхностных оксидных пленок металлов является одним из обязательных условий образования соединений с высокими механическими свойствами, хотя при достаточно продолжительном нагреве возможно плакирование и через оксидные пленки, но, как правило, при этом пластические свойства соединения снижаются.

Второе очевидное условие выполнения плакирования – образование между соединяемыми поверхностями физического контакта. Однако даже наличие физического контакта между чистыми поверхностями реальных металлических тел недостаточно для их сварки в твердом состоянии, для этого необходима некоторая активация атомов на соединяемых поверхностях: механическая за счет движения дислокаций и вакансий при пластической деформации или термическая. Нельзя считать вполне установленным, нужна ли такая активация для взаимной "подстройки" атомов на соединяемых поверхностях или также для частичного разрыва связей этих атомов со своими соседями.

Способность к схватыванию и соединению в твердом состоянии как одноименных, так и разноименных металлов и сплавов весьма различна и зависит от рода соединяемых металлов, а также от особенностей применяемого технологического процесса. Нет экспериментальных оснований для того, чтобы считать невозможным схватывание в твердом состоянии тех или иных разноименных металлов, тем более это справедливо для одноименных металлов. Ни резкое различие в размерах атомов, ни отсутствие взаимной растворимости, ни различие в типе кристаллической решетки не являются препятствием для схватывания разноименных металлов.

Трудности, нередко встречающиеся на пути получения прочного соединения при плакировании как одноименных, так и разноименных металлов, по-видимому, связаны не с их способностью к схватыванию, а с невозможностью сохранения образовавшихся узлов схватывания при возврате к нормальным условиям (снятие внешнего давления, охлаждения до комнатной температуры). Однако необходимы дальнейшие исследования для того,

чтобы однозначно установить взаимосвязь условий образования прочных соединений при плакировании с теми или иными физическими свойствами и особенностями строения соединяемых металлов и сплавов.

Актуальной задачей при получении многослойных материалов методами плакирования является прогноз прочности соединения составляющих композита. Необходимо разработать модель, позволяющую рассчитывать прочность сцепления на сдвиг составляющих биметаллического материала, полученного в процессе совместной пластической деформации разнородных металлов.

Решение этой задачи позволит более эффективно управлять процессом изготовления многослойных материалов, подбирая оптимальные условия и режимы деформирования.

Однако сложность совместной пластической деформации разнородных металлов, недостаточное знание физической природы образования соединения металлов в твердой фазе не позволяют в настоящее время получить универсальную аналитическую зависимость, пригодную для расчетов технологических параметров используемого процесса. Например, для расчета прочности соединения в зависимость должны были бы входить факторы, связанные с природой взаимодействующих материалов, состоянием их контактных поверхностей, скоростью, продолжительностью и температурой взаимодействия, состоянием окружающей среды, геометрическими характеристиками и др.

Некоторые из этих факторов влияют не только на прочность соединения, но и сложно взаимодействуют друг с другом. Способность материалов к схватыванию определяется в основном их пластичностью, т.е. способностью образовывать фактическую площадь контакта. Далее налагаются дополнительные условия: отсутствие или наличие защитных пленок, шероховатость поверхности и др. В атмосферных условиях определяющим фактором, препятствующим схватыванию металлов, является наличие на их поверхностях защитных оксидных пленок.

В процессе деформации эти пленки разрушаются, однако, если содержание кислорода в газовой среде достаточно велико, то они мгновенно образуются вновь, мешая тем самым непосредственному контакту ювенильных металлических поверхностей. В условиях глубокого вакуума сварка давлением происходит при ничтожно малых деформациях, а по мере "ухудшения" вакуума деформация возрастает. Таким образом, задача, прежде всего, сводится к исследованию процесса формирования фактической площади контакта шероховатых поверхностей.

Существует множество моделей описывающих процесс формирования фактической площади контакта, однако все они дают сходную зависимость:

$$\eta = 1 - \exp\left(k_1 \frac{q}{\sigma_{\text{ò}}} \right), \qquad (1)$$

где η – относительная фактическая площадь контакта; k_1 – коэффициент, зависящий от принимаемых в модели условий; q – нормальное контактное давление; $\sigma_т$ – предел текучести материала.

Из анализа зависимости (1) видно, что с ростом контактного давления, а следовательно и деформации, растет площадь фактического контакта металлов, что должно приводить к росту адгезионного схватывания поверхностей. В реальных условиях холодной пластической деформации и небольших скоростей деформирования, по-видимому, происходит следующее.

В результате пластической деформации соприкасающихся микровыступов и дальнейшего течения более мягкой составляющей происходит разрушение оксидных пленок и обнажение ювенильных поверхностей металла, однако, активное воздействие окружающей газовой среды на материал приводит к их регенерации. Так происходит до тех пор, пока поступление молекул газа через зазоры полностью не прекращается. Далее доступ газа к ювенильным поверхностям затрудняется, и возникают условия вакуума, способствующие образованию металлических связей.

Таким образом, первоначальное схватывание происходит на некоторых локальных участках, затем число таких участков увеличивается до образования сплошных зон соединения. Другими словами, фактическая площадь контакта η в процессе своего роста достигает величины η^*, после чего уже невозможна регенерация оксидных пленок; дальнейший рост η приводит к появлению оголенных поверхностей, на которых происходит образование металлических связей.

Приблизительную оценку для величины η можно получить на основе теории перкаляции. Согласно этой теории, при $\eta = 0{,}5$ в контакте начинает образовываться система замкнутых каналов куда не проникает воздух. Исходя из этого, в первом приближении можно принять, что $\eta = 0{,}5$.

Относительную площадь оголенных поверхностей $\eta_{оп}$ определим следующим образом:

$$\eta_{îï} = \begin{cases} 0, \text{åñëè } \eta \le \eta^*; \\ \eta - \eta^*, \text{ åñëè } \eta > \eta. \end{cases} \quad (2)$$

Описав таким образом схватывание шероховатых металлических поверхностей, перейдем к определению прочности сцепления на сдвиг при гидропрессовании биметаллического прутка. Для этого рассмотрим небольшой участок контакта металлов, образовавшийся в процессе совместной пластической деформации компонентов биметалла. Силу сцепления на сдвиг $F_{сц}$ определим как сумму сил механического зацепления и физического схватывания:

$$F_{ñö} = S_í T = (S_ô - S_{îï})k_{ñäâ} + S_{îï} k_{ñäâ}, \quad (3)$$

где $S_н$, $S_ф$ – соответственно номинальная и фактическая площади контакта; T – прочность сцепления на сдвиг; $S_{оп}$ – площадь оголенных (сварившихся) поверхностей; $k_{сдв}$, $k_{схв}$ – касательное напряжение на поверхностях соответственно сдвига и схватывания.

Отсюда прочность сцепления на сдвиг определяется как

$$T = (\eta - \eta_{îï})k_{ñäâ} + \eta_{îï} k_{ñäâ}. \quad (4)$$

Коэффициент k_1 и величины $k_{свх}$, $k_{свд}$ определим исходя из следующих соображений. Пусть $\eta_{оп} = 0$, т.е. происходит постоянная регенерация оксидных пленок, и вкладом отдельных сварившихся участков контакта можно пренебречь, в этом случае имеем простое механическое зацепление микронеровностей:

$$T = \eta k_{ñäâ} = \left[1 - \exp\left(k_1 \frac{q}{\sigma_{ò}}\right)\right] k_{ñäâ}. \quad (5)$$

Данная зависимость подобна полученной в работе [4]

$$T_{ñð} = \left[1 - \exp\left(=1{,}25 \frac{p_{ñð}}{\sigma_{òê}}\right)\right] k_{ï} T_{òê}, \quad (6)$$

где $T_{ср}$ – среднее напряжение трения; $p_{ср}$ – среднее контактное давление; $\sigma_{тк}$ – предел текучести материала в приконтактном слое; $T_{тк}$ – предел текучести материала в приконтактном слое при сдвиге; $k_п$ – константа поверхности.

Сопоставляя (5) и (6) видим, что $k_{сдв} = k_п T_{тк}$, $k_1 = 1{,}25$.

В работе [4] также были приведены физический смысл и численные значения k_1 в зависимости от влияния различных факторов и рекомендации по определению механических свойств приконтактного слоя металла $\sigma_{тк}$ и $T_{тк}$:

$$T_{òê} = 0{,}58\sigma_{òê} = \frac{0{,}58(\sigma_{ò}\sigma_{ò\max})}{2}, \quad (7)$$

где $\sigma_т$ – предел текучести в объеме металла вблизи контактной поверхности; $\sigma_{т\max}$ – предел текучести предельно упрочненного материала.

В качестве $k_{схв}$ следует брать, очевидно, какое-то среднее значение между $\sigma_{тк}$ и $T_{тк}$, поскольку в условиях микронеровностей на межслойной поверхности отрыв по мостикам схватывания может происходить как в нормальных, так и в касательных плоскостях сдвига. Для простоты в качестве $k_{схв}$ берем величину $T_{тк}$. В окончательном виде имеем прочность сцепления на сдвиг:

$$T = \left[1 - \exp\left(-1{,}25 \frac{q}{\sigma_{òê}}\right) - \eta_{îï}\right] k_{ï} T_{òê} + \eta_{îï} T_{òê}. \quad (8)$$

Соотношение (8) совместно с (2) может быть использовано для расчета прочности соединения составляющих биметалла в процессах плакирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Матвеев А.С.** Прокатка трехслойной ленты никель–сталь–никель // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 5. С. 42–44.
2. **Матвеев А.С.** Исследование технологии изготовления трехслойной ленты никель–сталь–никель // Цветные металлы. 2006. № 5. С. 78–80.
3. **Матвеев А.С.** Технологические аспекты изготовления трехслойной ленты никель–сталь–никель // Технология машиностроения. 2006. № 6. С. 35–36.
4. **Леванов А.Н.** Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.Г. Буркин и др. М.: Металлургия, 1976. 186 с.

Александр Сергеевич Матвеев, канд. техн. наук;
Владимир Николаевич Гадалов, д-р техн. наук;
Кирилл Александрович Крючков, инженер;
Сергей Борисович Григорьев;
А.Е. Мелихов, инженер

УДК 621.74

А.К. Шиков, А.Е. Воробьёва, Е.А. Дергунова, В.И. Тронза
(Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов, г. Москва),
Д.К. Фигуровский *(Московский государственный университет приборостроения и информатики)*

Разработка методики оценки размеров конструктивных элементов в полуфабрикатах сверхпроводников на основе Nb_3Sn

Рассмотрена возможность применения метода компьютерного анализа изображения поперечного сечения композиционного Nb_3Sn сверхпроводника для определения размеров составляющих его элементов. Разработана методика определения отношения Cu/не Cu с помощью программы Adobe Photoshop CS3. На основе анализа статистических данных установлено, что разработанный метод имеет высокую точность, а также является значительно более простым и быстрым, чем известный метод взвешивания фотографии. Разработанная методика эффективна для контроля сверхпроводников при их промышленном производстве.

The possibility of the image analysis application to the estimation of the elements of Nb_3Sn superconductor layout sizes is presented. The method of Cu/non-Cu volume ratio calculation is developed. The analysis is made by Adobe Photoshop CS3. Statistic shows that image analysis method has high accuracy. Also image analysis is more simple and quicker than paper mass method. The developed method is useful at the Nb_3Sn superconductors control under their industrial manufacturing.

Ключевые слова: сверхпроводник; композиционный материал; анализ изображения.

Keywords: superconductor; composite material; image analysis.

Важнейшим аспектом, обеспечивающим стабильную эксплуатацию композиционных сверхпроводниковых материалов, является обеспечение определенного количества стабилизирующей меди в оболочке сверхпроводника, позволяющей быстро отводить тепло в охлаждающий жидкий гелий при локальном переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние.

Сверхпроводящий провод на основе интерметаллического соединения Nb_3Sn представляет собой композиционный провод диаметром 0,82 мм, состоящий из ниобиевых жил со слоем сверхпроводящей фазы, которые равномерно распределены в бронзовой матрице, отделенной от медной стабилизации диффузионным барьером. Поперечное сечение Nb_3Sn сверхпроводника представлено на рис. 1. Получение стренда – это сложный технологический процесс, включающий в себя совместное прессование и волочение с промежуточными термообработками таких разнородных материалов, как ниобий, бронза и медь [1].

Объемное отношение медной стабилизации к безмедной области (Cu/не Cu) является одним из важнейших параметров технических Nb_3Sn сверхпроводников для магнитных систем и нуждается в строгом контроле. По требованиям к сверхпроводникам для магнитной системы Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР отношение Cu/не Cu должно составлять 1,0±0,1.

Повышение объемной доли стабилизирующей меди неизбежно приводит к уменьшению размера токонесущей сердцевины стренда и, следовательно, к снижению критического тока. Уменьшение доли стабилизирующей меди, хотя и повышает

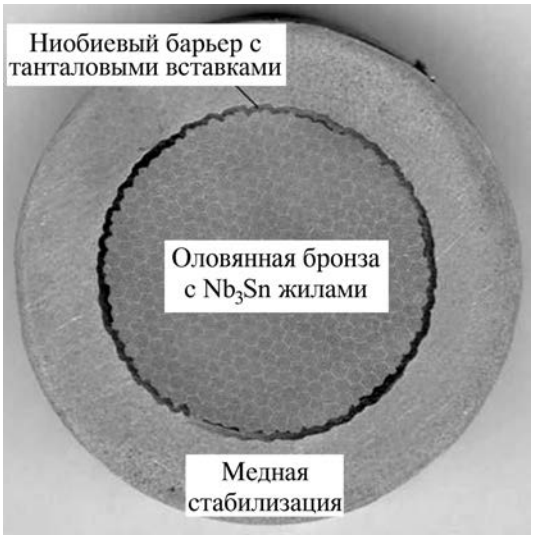


Рис. 1. Поперечное сечение прессованной заготовки для Nb_3Sn проводника

критический ток, в свою очередь приводит к снижению стабильности магнитной системы. Чтобы попасть в такой жесткий интервал, величину Cu/не Cu определяют неоднократно на разных этапах процесса получения проводника – после прессования заготовок, на промежуточных этапах волочения проволочной заготовки и на готовом композиционном проводе. Именно поэтому данная работа посвящена разработке и апробации новой методики определения отношения Cu/не Cu.

Разработка методики оценки размеров конструктивных элементов в полуфабрикатах сверхпроводников на основе Nb_3Sn имеет две основные задачи, которые решаются при выполнении данной работы и непосредственно связаны между собой: обеспечение эксплуатационной надежности сверхпроводниковых материалов и контроль соотношения конструктивных элементов на всех стадиях получения провода (прессование и волочение), являющегося одной из стадий технологического процесса. Использование разработанной методики позволяет выявить дефектные участки на всех этапах производства сверхпроводящего провода, что, в конечном счете, повлияет на выход годного продукта и снизит его себестоимость.

Контроль геометрии поперечного сечения композиционного прутка и отношения Cu/не Cu был проведен после прессования композиционной заготовки для сверхпроводников (см. рис. 1). "Концевые дефекты", возникающие в процессе деформации (прессование, волочение), по всей вероятности, связаны с разными скоростями истечения центральной и переферийных зон композиционного прутка, а также с различным уровнем значений механических свойств составляющих композита.

Существует несколько методов определения отношения Cu/не Cu. Наиболее распространенным является весовой метод, заключающийся во взвешивании образца с медной оболочкой и без нее. Достаточно известен метод измерения удельных сопротивлений всего провода и отдельно сверхпроводящей части [2].

В обоих методах медь стравливают в азотной кислоте, но поскольку диаметр прутка после прессования составляет более 40 мм, то стравливание такого количества меди является очень долгим процессом. Поэтому для определения Cu/не Cu на больших диаметрах используют метод взвешивания фотографии [3].

Этот метод заключается в вырезании из фотографии поперечного сечения прутка медной стабилизации, сердцевины и их взвешивании. Для этого от выдавленного композиционного прутка отрезают темплет высотой 15...20 мм, изготовляют шлиф поперечного сечения. Структуру поперечного сечения фотографируют или сканируют, затем изображение печатают. Фотографию разрезают по границе между медной стабилизацией и ниобиевым барьером. Затем отдельно взвешивают части фотографии, соответствующие медной оболочке и безмедной области. Отношение массы фотографии медной оболочки к массе фотографии безмедной области является значением Cu/не Cu. Погрешность метода составляет 5 % [3].

Однако этот метод является достаточно трудоемким и имеет большую погрешность, в связи с чем была разработана более простая и быстрая методика компьютерного анализа изображения. Суть разработанной методики заключается в определении площадей элементов сверхпроводника (медной и безмедной областей) с помощью компьютерной программы. Параметр Cu/не Cu рассчитывается как отношение площадей соответствующих элементов.

Как и в методе взвешивания фотографии, сначала необходимо получить цифровое изображение поперечного сечения. Для определения площадей элементов поперечного сечения выдавленного прутка был выбран программный пакет – Adobe Photoshop CS3.

Полученное цифровое изображение загружают в Adobe Photoshop CS3. С помощью инструмента "Быстрое выделение" ("Quick select") поочередно выделяют медную стабилизацию (рис. 2) и сверхпроводящую сердцевину (рис. 3) и определяют площадь каждого элемента в пикселях. Значение Cu/не Cu рассчитывают по формуле.

$$\text{Cu / не Cu} = \frac{S_{\text{Cu}}}{S_{SC}} \qquad (1)$$

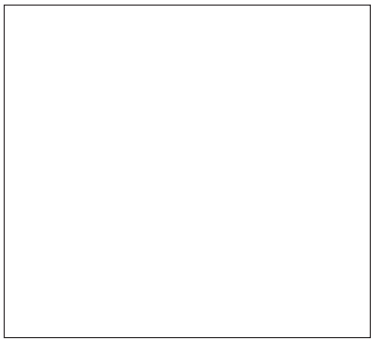


Рис. 2. Измерение площади меди

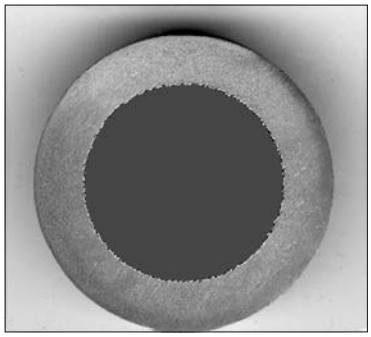


Рис. 3. Измерение площади сверхпроводящей области

1. Значения Cu/не Cu после прессования, полученные методом компьютерного анализа и весовым бумажным методом

Номер образца	Отношение Cu/не Cu		Разница между значениями, полученными разными методами |Δ|
	Бумажный весовой метод	Компьютерный анализ	
1	1,213	1,244	0,031
2	1,172	1,174	0,002
3	1,191	1,200	0,009
4	1,154	1,160	0,006
5	1,224	1,266	0,002
6	1,141	1,154	0,013
7	1,205	1,222	0,017
8	1,148	1,151	0,003
9	1,211	1,231	0,020
10	1,155	1,171	0,016
11	1,264	1,245	0,019
12	1,259	1,169	0,010

2. Результаты статистической обработки

Среднее значение Cu/не Cu	Стандартное отклонение	Доверительный интервал	Относительная погрешность, %
1,17	0,0012	0,0004	0,04

где S_{Cu} – площадь меди, пиксели; S_{SC} – площадь сверхпроводящей области, пиксели.

Для оценки работоспособности этой методики было проведено сравнение результатов, полученных методом взвешивания фотографии и компьютерным анализом изображения (табл. 1) композиционных прутков после прессования.

Как видно из таблицы, различие между значениями, полученными двумя разными способами без учета погрешности, несущественно и составляет от 0,002 до 0,031 абсолютных единиц, что значительно меньше требуемого допуска ±0,1.

Для определения воспроизводимости результатов и оценки погрешности по разработанному методу выбрали один темплет, вырезанный из прессованного прутка. На нем выполнили серию из 60 замеров, позволивших провести оценку воспроизводимости результатов определения отношения Cu/не Cu. По полученным данным была проведена статистическая обработка, результаты которой представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, значение относительной погрешности составляет сотые доли процента и, следовательно, этот метод дает высокую воспроизводимость. Таким образом, разработанный метод имеет высокую точность, а также является значительно более простым и быстрым. Это связано с отсутствием такой субъективной операции, как разрезка фотографии на медную и немедную части. Разработанная методика будет рекомендована для применения на промышленном производстве сверхпроводников и адаптирована к другим стадиям производства, на которых необходим контроль параметра Cu/не Cu.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шиков А.** Российские низкотемпературные сверхпроводники // Национальная металлургия. 2004. № 2.

2. **Pyon T., Wames W.H., Siddall M.** Evaluation of Cu:SC ratio measurements by chemical etching, electrical resistivity, and image analysis // IEEE Transaction on applied superconductivity. March 1993. Vol. 3. № 1.

3. **International** standart IEC (International Electronical Commission) 61788-12 Superconductivity – part 12: Matrix to superconductor volume ratio measure – Copper to non-coper volume ratio of Nb_3Sn composite superconducting wires, IEC, 2002-06.

Александр Константинович Шиков,
д-р техн. наук;
Александра Евгеньевна Воробьёва,
канд. техн. наук;
Елена Александровна Дергунова, канд. техн. наук;
Владимир Иванович Тронза, инженер;
Дмитрий Константинович Фигуровский,
канд. техн. наук

УДК 621.763

Г.С. Гарибов *(ОАО "Всероссийский институт легких сплавов", Москва)*

К вопросу о выборе технологии и оборудования для производства высококачественных гранул крупностью менее 100...70 мкм при изготовлении критических компонентов современных и перспективных авиационных газотурбинных двигателей.

*Продолжение**

Рассмотрены альтернативные методы производства гранул из жаропрочных никелевых сплавов. Показано, что для изготовления ответственных деталей авиационных двигателей методом горячего изостатического прессования без последующей пластической деформации можно использовать только гранулы, полученные плазменной плавкой и центробежным распылением быстровращающейся литой заготовки, которые не имеют внутригранульных пор.

The paper discusses alternative techniques for manufacturing Ni-base superalloys spherical powders. It is shown that only internal pore-free powders produced by PREP technique can be used manufacturing critical aircraft engine components via the HIP technique without subsequent plastic working.

Ключевые слова: гранулы; сплавы; газоструйное распыление; изостатическое прессование; технология.

Keywords: powders; alloys; gas atomization; isostatic pressing; technology.

Выход годных дисков для изделия "20" (ныне "117с") из гранул сплава ЭП962П по всем параметрам, отвечающим требованиям технических условий, не превышал 10 %. При этом наблюдали неоднородность свойств по объему компактной заготовки, что не характерно для материала, отпрессованного из гранул в газостате.

Улучшить качество гранул дополнительной плазменной обработкой, дезинтегратором и другими методами не удалось.

Оставался один путь – применение технологии "Гаторайзинг" (изотермической сверхпластической штамповки). В этом случае необходимы были колоссальные финансовые средства и снятие запретов Комитета "Коком" НАТО. Это также было невозможно.

К недостаткам газоструйного распыления можно отнести высокий процент газовой пористости в массе гранул в результате кавитации (рис. 4); термически активированную пористость, которая ограничивает возможность формирования свойств и структурную однородность заготовок при термической обработке (закалка ведется в двухфазной области); низкую текучесть порошка вследствие образования сателлитов и гранул с внедренными частицами (рис. 5).

На рис. 6 приведены образцы гранул сплава Udimet 720, полученные газоструйным распылением [15, 22].

Рис. 4. Структура пористых гранул, полученных газоструйным распылением расплава. ×250

* Начало см. № 8, 2009.

Рис. 5. Гранулы, полученные газоструйным распылением расплава с приварившимися и внедренными частицами. ×250

Рис. 6. Конгломераты гранул сплава Udimet 720, полученные газоструйным распылением

Мелкодисперсные гранулы, которые стремятся получать для уменьшения влияния газовой пористости на свойства компактного материала, обладают повышенной склонностью к абсорбции газа и влаги, требуют дополнительных технологических операций, таких как горячее прессование (экструзия) с большим коэффициентом вытяжки в целях подготовки структуры материала (сверхмелкое зерно) к штамповке в режиме сверхпластичности для получения фасонных заготовок [8].

Для подготовки структуры материала и производства указанных заготовок необходимо уникальное технологическое оборудование, работающее в вакуумных камерах, что в конечном итоге делает изготовляемую продукцию значительно более дорогостоящей по сравнению с прямым ГИП.

Анализ качества гранул, полученных по двум технологиям, показывает, что гранулы, изготовленные методом ГИП, более предпочтительны с точки зрения их использования в процессе прямого компактирования. Поэтому ВИЛС в 1980-х гг. отдал предпочтение развитию именно процесса ГИП для производства критических деталей газовых турбин авиационных двигателей военного и гражданского применения, а позже и для промышленных газовых турбин.

В мировой практике порошки жаропрочных никелевых сплавов широко используют для изготовления заготовок дисков авиационных и ракетных двигателей. Как правило, для этих целей применяют мелкодисперсные порошки крупностью менее 200 меш (70 мкм), получаемые распылением расплавленного металла аргоном высокого давления или растворенным в металле водородом (фирмы Homogeneous Metals Inc., General Electric Co., Special Metals Inc., Crucible Research Center, Crucible Metals Compaction и др.) [7, 8].

По данным компаний Ladish Co. и Wyman Gordon Co. (США), фирма General Electric Co. использует гранулы крупностью менее 40 мкм для производства дисков по методу "Гаторайзинг" на Ladish Co., где установлены три вакуумных изотермических пресса, в том числе пресс силой 100 МН, построенный при участии General Electric Co.

Мелкие гранулы необходимы, во-первых, для уменьшения размера внутригранульных пор, образующихся при газоструйном распылении аргоном, во-вторых, для получения сверхмелкого зерна в процессе экструзии заготовки из них для последующей сверхпластической деформации при штамповке дисков [23].

Это чрезвычайно сложно и дорого. Диски одинакового диаметра с дисками двигателя ПС90А, из-

готовляемые фирмой Wyman Gordon Co. (США), в 8–12 раз дороже дисков, изготовляемых ОАО "ВИЛС" (сплав Rene 88, информация 1996 г.).

Технология "Гаторайзинг" очень дорогостоящая, поэтому и американские специалисты уже к 1998 г. эксплуатировали более 100 тыс. дисков, полученных исключительно изостатическим прессованием, без последующей пластической деформации ("as-HIP") [24]. В настоящее время число дисков увеличилось до 500 тыс. Для этих целей фирмы General Electric Inc. и CME International используют уже гранулы крупностью менее 106 мкм, что следует из доклада Президента ведущей металлургической компании США Crucible Research Center, доктора William B. Eisen на Международной конференции "Суперсплавы для газовых турбин", которая состоялась в 1998 г. в г. Тампа (США) [25].

В докладе указано, что крупность всех применяемых порошков составляет менее 106 мкм. Гранулы сплавов Rene 95 и Astroloy используют для дисков двигателей CFM-56, CF-6-80C2/E1, которые устанавливают на 19 типах пассажирских самолетов США и Европы. В докладе также приведена информация фирмы Allied Signal (ныне Honeywell) о том, что свыше 1000 узлов, оснащенных ступицей из гранул, соединенной с литым олопаченным кольцом, и размещенных на 331 модели двигателей, наработали более 12 млн ч без разрушений [24].

В США подавляющее большинство фирм получают гранулы методом газоструйного распыления металла, расплавляемого в керамическом тигле индукционной печи. Вследствие этого в массу гранул заносится повышенное количество неметаллических частиц. Кроме того, в результате захлопывания (захватывания) аргона внутри гранул в процессе их кристаллизации образуется внутригранульная пористость, отрицательно влияющая на работоспособность компактного материала при его эксплуатации в ГТД [6–8]. Такая схема производства вынуждает получать максимально мелкие гранулы, чтобы предельно уменьшить величину внутригранульных пор. Однако чем мельче крупность гранул (например 40 мкм), тем больше их общая поверхность, которую надо диффузионно сращивать в процессе ГИП для получения компактного материала 100%-ной плотности. Это крайне затруднительно. Поэтому для прямого ГИП в США, как и в России, используют гранулы крупностью менее 106 мкм [24, 25].

В США полностью отсутствуют процессы электростатической сепарации массы гранул для удаления неметаллических и керамических частиц – основных источников зарождения трещин в дисках в процессе их эксплуатации. В большинстве случаев отсутствует процесс сепарации массы гранул от металлических частиц. Технология термической дегазации, при которой большую массу (1...2 т) гранул (рис. 7), заполненную в высокую трубу диаметром примерно 500...550 мм, устанавливают в шахтную печь, подвергают нагреву и одновременной дегазации форвакуумным насосом через трубочки, вваренные в крышку трубы, неэффективна и не обеспечивает десорбции загрязнений с поверхности гранул и трубы капсулы под действием вакуума и температуры [23].

Рис. 7. Капсулы с гранулами перед термической дегазацией (компания IMT): *1* – капсула; *2* – крышка; *3* – вакуумные вентили; *4* – трубки для откачки

Это было доказано в работах В.И. Ходкина [26] и В.Я. Кошелева [27]. Ими были проведены прямые эксперименты в глубоком вакууме (10^{-5} мм рт. ст.) и при высокой температуре (до 900 °С) на капсулах с гранулами, имеющих отверстие для дегазации, почти равное диаметру капсулы. Было выявлено, что при толщине слоя гранул более 180 мм процесс десорбции загрязнений с поверхности гранул останавливается независимо от диаметра отверстия, температуры, степени и длительности откачки вакуума [26–28].

Повышенное количество неметаллических частиц, внутригранульная пористость, развитая поверхность массы засыпки гранул, отсутствие процессов сепарации металлических и неметаллических частиц, неэффективная термическая дегазация гранул вынуждает американских специалистов предпринимать дорогостоящие мероприятия по устранению указанных выше недостатков [7, 8].

Гранулы подвергают горячей экструзии для повышения их активности при диффузионном сращивании (вскрытие ювенильных поверхностей), для устранения внутригранульной пористости и измельчения неметаллических частиц. Прутки, отпрессованные, как правило, на прессе силой 450 МН фирмы Cameron в Хьюстоне, разрезают на мерные заготовки, механически обрабатывают и подвергают ультразвуковому контролю в целях обнаружения включений и пористости. Далее мерные заготовки отправляют на одну из фирм для осадки на шайбы и механической обработки. Такие шайбы с уже сформировавшейся структурой со сверхмелким зерном отправляют на фирмы Ladish Co., Wyman Gordon Co., Pratt and Whithney Aircraft для изотермической сверхпластической штамповки (метод "Гаторайзинг") [8, 23].

Однако в США также наметился прогресс в технологии производства дисков. На заводе фирмы Wyman Gordon Co. на прессах силой 500 МН фирмы "Леви" многопереходной штамповкой путем дробной деформации получают крупногабаритные диски из обточенных гомогенизированных в электрических печах компактных заготовок среднего диаметра (400...600 мм) сплавов Rene 95, Rene 88 ДТ, Astroloy, In 906 и др. На фирме Ladish Co. помимо изотермической штамповки для производства дисков из гранул применяют мощный молот со встречным движением движущихся частей.

Предложенный специалистами ОАО "ВИЛС" "ESR-CIG-process", так называемый "процесс тройного переплава", рекламируемый фирмой ALD, представляет собой обычный процесс газоструйного распыления, совмещенный с электрошлаковым переплавом предварительно отлитых в вакуумных печах и механически обработанных электродов калибра УЦР (74...78 мм). Плавку ведут в водоохлаждаемом медном тигле. Очищенный в шлаке металл направляется через индукционную медную направляющую систему в форсунку для диспергирования на гранулы струей инертного газа с высокой кинетической энергией.

Качество гранул, получаемых газоструйным распылением, было показано выше.

Технико-экономические показатели предлагаемого процесса не ясны (с учетом всех подготовительных операций).

Компактную заготовку из таких гранул современных сложнолегированных жаропрочных никелевых сплавов (мелкодисперсных, крупностью менее 50 мкм) очень трудно деформировать. Для этого нужен дорогостоящий комплекс специального уникального оборудования, состоящий из многих единиц (нагревательные печи, экструзионный пресс, штамповочный тихоходный пресс с управляемой скоростью деформирования, специальные штампы из специальных материалов и др.). Стоимость такого обрабатывающего комплекса многократно превышает стоимость установки "ESR-CIG-process".

При наличии перечисленного оборудования необходимо проведение комплекса металлургических, металловедческих, деформационных исследований, который может занять 3–5 лет и более. При этом надо знать, для каких двигателей нужен такой материал, по какой ориентировочной цене.

Указанные выше исследования необходимы и обязательны и в случае применения режима дробной деформации рекристаллизованного материала.

Чтобы начать поставки дисков из такого материала, обязательны паспортизация и сертификация материала, испытание в составе двигателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

22. **Tornberg C.** Particle Size Prediction in an Atomization System // Advances in Powder Metallurgy. MPIF, Princeton, NY, 1992. № 1. P. 137–150.

23. **Гарибов Г.С.** Современный уровень развития порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2000. № 6. С. 58–69.

24. **Eisen W.B.** P/M Superalloys: a Current Perspective // International Journal of Powder Metallurgy. 1997. V. 8. № 33. P. 62–66.

25. **Eisen W.B.** The Current Status of as- HIPed Superalloys in Aircraft Engines / Proceeding of International Techno-Business Conference on the Superalloys Industry "Superalloys for Gas Turbine". Tampa, Florida, USA, 1998. P. 73–84.

26. **Ходкин В.И.** Исследование процессов и создание технологии импульсно-механической и вакуумно-термической обработки гранул жаропрочных никелевых сплавов при производстве заготовок для двигателестроения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИЛС, 1982.

27. **Кошелев В.Я.** Исследование процесса, разработка и внедрение промышленной технологии термической дегазации гранул жаропрочных никелевых сплавов типа ЭП741НП при производстве заготовок дисков ГТД: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИЛС, 1985.

28. **Кошелев В.Я., Гарибов Г.С., Ходкин В.И., Бувин Е.П.** Исследование процесса и разработка промышленной технологии вакуумной термической дегазации гранул жаропрочных никелевых сплавов / Металлургия гранул. Вып. 1. М.: ВИЛС, 1989. С. 192–197.

Генрих Саркисович Гарибов, д-р техн. наук

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ: *учебник*

С.И. Богодухов, А.Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов, Е.С. Козик

М.: Машиностроение, 2009. – 432 с. ISBN: 978-5-94275-467-9

Цена 550 р. с НДС

Представлены сведения по выбору и основам проектирования заготовок в автоматизированном машиностроении.

Приведены современные основные термины и определения в области заготовительного производства. Кратко изложены вопросы производства литых, штампованных и других видов заготовок из современных конструкционных материалов – сплавов черных и цветных металлов, порошковых, неметаллических и композиционных материалов.

Даны научные основы методологии выбора и проектирования прогрессивных заготовок, обеспечивающих необходимую технологическую наследственность, энерго- и металлосбережение. Показаны подходы к автоматизации проектирования технологических процессов заготовительного производства.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». **Гриф Минобрнауки.**

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в ООО "Издательство Машиностроение" в отдел продаж, маркетинга и рекламы: по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

Промышленные выставки в октябре–декабре 2009 г.

Äàòà ïðîâåäåíèÿ	Íàçâàíèå âûñòàâêè	Ìåñòî ïðîâåäåíèÿ	Òåìàòèêà ðàçäåëû*
ÎÊÒßÁÐÜ			
7–9 îêòÿáðÿ	**Ëèòåéíîå äåëî. Ìàòåëóðãè÷åñêèå òåõíîëîãèè. Ñòàíêè. Ìàòåëîîáðàáîòêà. Èíñòðóìåíò. Ñâàðêà–2009** Ìåæäóíàðîäíàÿ ñïåöèàëèçèðîâàííàÿ âûñòàâêà	**Íàáåðåæíûå ×åëíû,** ÊÄÊ «ÊÀÌÀÇ»	×¸ðíàÿ ìåòàëëóðãèÿ. Öâåòíàÿ ìåòàëëóðãèÿ. Ëèòåéíîå ïðîèçâîäñòâî. Òåõíîëîãèÿ è îáîðóäîâàíèå äëÿ ëèòüÿ ïîä äàâëåíèåì, äëÿ òî÷íîãî ëèòüÿ, äëÿ èçãîòîâëåíèÿ ôîðì è ñòåðæíåé. Îáîðóäîâàíèå äëÿ ìîäèôèöèðîâàíèÿ ëèòåéíûõ ñïëàâîâ, äîçèðîâàíèÿ è çàëèâêè ëèòåéíûõ ôîðì. Ïðîìûøëåííîå îáîðóäîâàíèå. Òåõíîëîãèè è îáîðóäîâàíèå äëÿ ñâàðêè è òåðìè÷åñêîé ðåçêè ìåòàëëîâ. Ñâàðî÷íûå ìàòåðèàëû è ïðèíàäëåæíîñòè
13–16 îêòÿáðÿ	**Weldex/Ðîññâàðêà–2009** 9-ÿ Ìåæäóíàðîäíàÿ ñïåöèàëèçèðîâàííàÿ âûñòàâêà ñâàðî÷íûõ ìàòåðèàëîâ, îáîðóäîâàíèÿ è òåõíîëîãèé	**Ìîñêâà,** ÌÂÖ «Êðîêóñ Ýêñïî»	Îáîðóäîâàíèå è òåõíîëîãèè äëÿ äóãîâîé ñâàðêè ìåòàëëîâ, äëÿ ïëàçìåííîé, ëàçåðíîé, ãàçîïëàìåííîé ñâàðêè, ðåçêè, íàïëàâêè, äëÿ êîíòàêòíîé ñâàðêè, äëÿ ñâàðêè ïëàñòìàññ, äëÿ ïàéêè. Îáîðóäîâàíèå è òåõíîëîãèè ïðèçâîäñòâà ñâàðî÷íûõ ìàòåðèàëîâ. Ìàòåðèàëû äëÿ ñâàðêè, ðåçêè, íàïëàâêè, íàïûëåíèÿ, ïàéêè
	ËèòÝêñ–2009 4-ÿ Ìåæäóíàðîäíàÿ âûñòàâêà ëèòåéíîé ïðîäóêöèè, òåõíîëîãèé, îáîðóäîâàíèÿ è ìàòåðèàëîâ äëÿ ïðîçâîäñòâà ëèòüÿ	**Äíåïðîïåòðîâñê,** Ýêñï-öåíòð «Ìåòåîð»	Ïðîçâîäèòåëè ñòàëüíîãî, ÷óãóííîãî è öâåòíîãî ëèòüÿ. Îáîðóäîâàíèå è ìàòåðèàëû äëÿ ïðîçâîäñòâà ëèòüÿ. Îñíàñòêà. Õóäîæåñòâåííîå ëèòüå, êîâêà. Ïðîåêòèðîâàíèå ëèòåéíûõ öåõîâ, ó÷àñòêîâ è ïðîçâîäñòâ. Ïðîãðàìì íîå îáåñïå÷åíèå è ìîäåëèðîâàíèå ëèòåéíûõ ïðîöåññîâ
ÍÎßÁÐÜ			
10–13 íîÿáðÿ	**Ìåòàëë–Ýêñïî–2009** 15-ÿ Ìåæäóíàðîäíàÿ ïðîìûøëåííàÿ âûñòàâêà	**Ìîñêâà,** ÌÂÖ «Êðîêóñ Ýêñïî»	Ïðîçâîäñòâî è ïðîäóêöèÿ ÷åðíîé è öâåòíîé ìåòàëëóðãèè. Ïðîäóêöèÿ âûñîêîãî ïåðåäåëîâ: òóóáû, ëèñòî ñ ïîêðûòèåì, ìåòàëëîçàäåëèÿ, ñïåöñòàëè, ñïåöñïèâàâû. Ëèñòî- è ñîðòîïðîêàòîêà: ðåçêà, ïðîôèëèðîâàíèå, ãèáêà, ñâàðêà. Ñâàðî÷íûå ìàòåðèàëû, îáîðóäîâàíèå è òåõíîëîãèè. Îãíåóïîðû, òåõíè÷åñêàÿ êåðàìèêà äëÿ ìåòàëëóðãèè è ëèòåéíîãî ïðîçâîäñòâà
23–26 íîÿáðÿ	**Ìåòàëëîîáðàáàòûâàþùåå îáîðóäîâàíèå–2009** Ìåæäóíàðîäíàÿ ñïåöèàëèçèðîâàííàÿ âûñòàâêà	**Ìîñêâà,** ÊÂÖ «Ñîêîëüíèêè»	Ìåòàëëîðåæóùèå ñòàíêè, àâòîìàòû, ëèíèè è îáðàáàòûâàþùèå öåíòðû, âòîì ÷èñëå ñ ×ÏÓ. Ìàøèíû êóçíå÷íî-ïðåññîâûå è äðóãîå îáîðóäîâàíèå äëÿ îáðàáîòêè ìåòàëëîâ äàâëåíèåì. Ñâàðî÷íîå îáîðóäîâàíèå. Îáîðóäîâàíèå äëÿ òåðìè÷åñêîé îáðàáîòêè è äð. âèäîâ óïðî÷íÿþùåãî ìåòàëëîâ

Äàòà ïðîâåäåíèÿ	Íàçâàíèå âûñòàâêè	Ìåñòî ïðîâåäåíèÿ	Òåìàòèêà ðàçäåëû*
23–26 íîÿáðÿ	**Ðåòåêîìàø–2009** 8-ÿ Ìåæäóíàðîäíàÿ ñïåöèàëèçèðîâàííàÿ âûñòàâêà ïî ðåìîíòó, âîññòàíîâëåíèþ è ìîäåðíèçàöèè ìàøèí è îáîðóäîâàíèÿ	**Ìîñêâà,** ÊÂÖ «Ñîêîëüíèêè»	Òåõíîëîãèÿ ðåìîíòà è âîññòàíîâëåíèÿ ïîòðåáèòåëüñêèõ ñâîéñòâ îáîðóäîâàíèÿ. Ðåòðîôèòèíã – âîññòàíîâëåíèå îáîðóäîâàíèÿ ñ íîâûìè ïîòðåáèòåëüñêèìè ñâîéñòâàìè. Ñîâðåìåííûå òåõíîëîãèè âîññòàíîâëåíèÿ äåòàëåé è óçëîâ ìàøèí. Ýêîíîìèêà âîññòàíîâëåíèÿ è èñïîëüçîâàíèÿ ïîäåðæàííîãî îáîðóäîâàíèÿ. Ìàðêåòèíã, èíôîðìàöèÿ è ðûíêè ïîäåðæàííîãî îáîðóäîâàíèÿ Ëèçèíã
	Ìàøêî ìàø–2009 8-ÿ Ìåæäóíàðîäíàÿ ñïåöèàëèçèðîâàííàÿ âûñòàâêà êî ìïëåêòóþùèõ èçäåëèé â ìàøèíîñòðîåíèè	**Ìîñêâà,** ÊÂÖ «Ñîêîëüíèêè»	× ÏÓ è óïðàâëÿþùèå ñèñòåìû, èõ ìàòåìàòèêî-åñêîå îáåñïå÷åíèå. Êîìïëåêñíûå ïðèâîäà, ýëåêòðîäâèãàòåëè è ýëåêòðîòåõíè÷åñêèå è ïíåâìàòè÷åñêèå êîìïîíåíòû. Ãèäðàâëè÷åñêèå è ïíåâìàòè÷åñêèå ñèñòåìû, ñîñòàâëÿþùèå êíèì. Ãèäðîäâèãàòåëè, ãèäðîíàñîñû, âèäåîñòàíöèè. Íîâûå ìàòåðèàëû â ìàøèíîñòðîåíèè. Ìàòðèöàìè â ìàøèíîñòðîåíèè. Ìåòðîëîãèÿ, èçìåðåíèåüíûå ñèñòåìû, êîíòðîëüíî-èçìåðèòåëüíàÿ àïïàðàòóðà, ìåðèòåëüíûé èíñòðóìåíò, ñèñòåìû äèàãíîñòèêè, èñïûòàòåëüíûå ñòåíäû
ÄÅÊÀÁÐÜ			
8–11 äåêàáðÿ	**TechnoÑâàðêà–2009** 4-ÿ ñïåöèàëèçèðîâàííàÿ âûñòàâêà	**Êàçàíü,** ÂÖ "Êàçàíñêàÿ ÿðìàðêà"	Îáîðóäîâàíèå è òåõíîëîãèè äëÿ ñâàðêè è òåðìè÷åñêîé ðåçêè ìåòàëëîâ. Ñâàðî÷íûå ìàòåðèàëû, ïðèíàäëåæíîñòè, êî ìïëåêòóþùèå èçäåëèÿ. Îáîðóäîâàíèå è òåõíîëîãèè äëÿ ïàéêè. Àâòîìàòèçàöèÿ ñâàðî÷íûõ ðàáîò. Êîíòðîëüíî-èçìåðèòåëüíàÿ òåõíèêà. Òåõíè÷åñêàÿ äèàãíîñòèêà. Íåðàçðóøàþùèé êîíòðîëü
	Ìàøèíñòðîåíèå. Ìåòàëëîîáðàáîòêà. Êàçàíü–2009 9-ÿ Ìåæäóíàðîäíàÿ ñïåöèàëèçèðîâàííàÿ âûñòàâêà	**Êàçàíü,** ÂÖ "Êàçàíñêàÿ ÿðìàðêà"	Ìåòàëëîîáðàáàòûâàþùåå è ìåòàëëîðåæóùåå îáîðóäîâàíèå. Ëèçåðíîå îáîðóäîâàíèå. Ëèòåéíîå îáîðóäîâàíèå. Êóçíå÷íî-ïðåññîâîå îáîðóäîâàíèå. Îáîðóäîâàíèå äëÿ òåðìî÷åñêîé îáðàáîòêè. Îáîðóäîâàíèå äëÿ íàíåñåíèÿ ïîêðûòèé. Êîíòðîëüíî-èçìåðèòåëüíîå îáîðóäîâàíèå, ïðèáîðû è èíñòðóìåíòû. Ñâàðî÷íîå îáîðóäîâàíèå
8–10 äåêàáðÿ	**Òåõíîôîðóì–2009** 10-ÿ ïðîìûøëåííî-òåõíè÷åñêàÿ âûñòàâêà	**Âîëãîãðàä,** Âîëãîãðàäñêèé äâîðåö ñïîðòà	Ìåòàëëóðãèÿ è ëèòåéíîå äåëî. Îáðàáîòêà ìåòàëëîâ. Ìàøèíîñòðîåíèå. Ñòàíêîñòðîåíèå. Ñâàðêà. Íàñîñû è êîìïðåññîðû. Ïîäøèïíèêè. Çàùèòà îò êîððîçèè

* Ïîäðîáíóþ èíôîðìàöèþ îá îñíîâíûõ òåìàòèêàõ ðàçäåëàõ âûñòàâîê ñì. íà ñàéòå www.exponet.ru.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 06.07.09 г. Подписано в печать 08.09.09 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,44. Заказ 734. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.

Поздравляем!

Алексея Ивановича Белякова

êàíäèäàòà òåõíè÷åñêèõ íàóê

с 60-летием

Àëåêñåé Èâàíîâè÷ Áåëÿêîâ ðîäèëñÿ 24 ñåíòÿáðÿ 1949 ã. â ã. Ðûáèíñêå ßðîñëàâñêîé îáëàñòè.

Â 1972 ã. çàêî í÷ëë Ðûáèíñêèé âå÷åðíèé àâèàöèîííûé èíñòèòóò ïî ñïåöèàëüíîñòè "Ìàøèíû è òåõíîëîãèè ëèòåéíîãî ïðîèçâîäñòâà". Ïîñëå îêî í÷àíèÿ èíñòèòóòà â òå÷åíèå äâóõ ëåò ðàáîòàë ìàñòåðîì, òåõíîëîãîì è çàòåì íà÷àëüíèêîì òåõíîëîãè÷åñêîãî áþðî â ÷óãóíîëèòåéíîì öåõå Îðåõîâñêîãî ìàøèíîñòðîèòåëüíîãî çàâîäà èì. Ìåäâåäåâà.

Â 1974 ã. ïîñòóïëë â î÷íóþ àñïèðàíòóðó ïðè ÍÏÎ ÖÍÈÈÒÌÀØ (íûíå ÎÀÎ ÍÏÎ "ÖÍÈÈÒÌÀØ"). Â 1979 ã. óñïåøíî çàùèòèë êàíäèäàòñêóþ äèññåðòàöèþ ïî ñïåöèàëüíîñòè "Ëèòåéíîå ïðîèçâîäñòâî".

Ñ 1975 ã. ðàáîòàë â ÍÏÎ ÖÍÈÈÒÌÀØ. Îñíîâíûå ýòàïû íàó÷íî-òðóäîâîé äåÿòåëüíîñòè: 1975–1981 ãã. – ìëàäøèé íàó÷íûé ñîòðóäíèê; 1981–1992 ãã. – ñòàðøèé íàó÷íûé ñîòðóäíèê, 1992–2001 ãã. – âåäóùèé íàó÷íûé ñîòðóäíèê; ñ 2001 ïî 2005 ã. – çàâåäóþùèé ïîäðàçäåëåíèåì 1 22 èíñòèòóòà.

Íàó÷íî-ïðàêòè÷åñêèå ðàáîòû À.È. Áåëÿêîâà ñâÿçàíû ñ ïðîöåññàìè çàòâåðäåâàíèÿ, ïèòàíèÿ, ìîäåëèðîâàíèÿ è ëåãåðîâàíèÿ îòëèâîê èç ÷óãóíîâ ñ øàðîâèäíûì ãðàôèòîì è ñïåöèàëüíûìè ñâîéñòâàìè; ïî êîíòðîëþ êà÷åñòâà ðàñïëàâà ÷åðíûõ è öâåòíûõ ñïëàâîâ ñ ïîìîùüþ òåðìîãðàôè÷åñêîãî àíàëèçà; ïî èññëåäîâàíèþ âëèÿíèÿ ëåãåðîâàíèÿ è ìîäèôèöèðîâàíèÿ íà ôèçèêî-ìåõàíè÷åñêèå è ýêñïëóàòàöèîííûå ñâîéñòâà ÷óãóíîâ.

Ðåçóëüòàòû íàó÷íûõ ðàáîò îòìå÷åíû çîëîòûìè ìåäàëÿìè è äèïëîìàìè ÂÂÖ, à òàêæå äèïëîìàìè ìåæäóíàðîäíûõ è îòå÷åñòâåííûõ âûñòàâîê. À.È. Áåëÿêîâ íàãðàæäåí ìåäàëüþ "Â ïàìÿòü 850-ëåòèÿ Ìîñêâû".

Â àêòèâå Àëåêñåÿ Èâàíîâè÷à Áåëÿêîâà ñâûøå 30 àâòîðñêèõ ñâèäåòåëüñòâ è ïàòåíòîâ, áîëåå 120 íàó÷íûõ ðàáîò. Â 2000 ã. â èçäàòåëüñòâå "Ìàøèíîñòðîåíèå" âûøåë òîì II-2 ýíöèêëîïåäèè "Ñòàëè. ×óãóíû" (Ã.Ã. Ìóõèí, À.È. Áåëÿêîâ, Í.Í. Àëåêñàíäðîâ è äð.). Â 2009 ã. ïîä ðåäàêöèåé À.È. Áåëÿêîâà âûõîäèò "Ïðîèçâîäñòâî òîëêâîê èç âûñîêîïðî÷íîãî ÷óãóíà ñ øàðîâèäíûì ãðàôèòîì".

Àëåêñåé Èâàíîâè÷ Áåëÿêîâ ÿâëÿåòñÿ äåéñòâóþùèì ÷ëåíîì Àêàäåìèè ïðîáëåì êà÷åñòâà ÐÔ, ÷ëåíîì ðåäàêöèîííûõ ñîâåòîâ æóðíàëîâ "Ñïðàâî÷íèê. Èíæåíåðíûé æóðíàë" è "Çàãîòîâèòåëüíûå ïðîèçâîäñòâà â ìàøèíîñòðîåíèè".

Çà ñîçäàíèå è øèðîêîå ïðîìûøëåííîå âíåäðåíèå íîâîãî êëàññà êîíñòðóêöèîííûõ ÷óãóíîâ ñ âûñîêèì ñâîéñòâàìè ñîâìåñòíî ñ ðóïïîé ó÷åíûõ ÎÀÎ "ÖÍÈÈÒÌÀØ" è ðÿäà ïðåäïðèÿòèé ñòðàíû À.È. Áåëÿêîâó ïðèñóæäåíà ïðåìèÿ Ïðàâèòåëüñòâà Ðîññèéñêîé Ôåäåðàöèè â îáëàñòè íàóêè è òåõíèêè çà 2003 ã.

Ñ 2005 ã. ïî íàñòîÿùåå âðåìÿ À.È. Áåëÿêîâ ðàáîòàåò ïåðâûì çàìåñòèòåëåì ãåíåðàëüíîãî äèðåêòîðà èòàëüÿíñêîé ôèðìû ÎÎÎ "ÌåòàëËèòÌàø" (ã. Êîëîìíà Ìîñêîâñêîé îáë.), ïðîèçâîäÿùåé ÷óãóííûå ëèòåéíûå îòëèâêè äëÿ ðàçëè÷íûõ îòðàñëåé, òàêèõ êàê àâòîìîáèëüíàÿ, ñòàíêîñòðîèòåëüíàÿ, ýëåêòðîòåõíè÷åñêàÿ, ìàøèíîñòðîèòåëüíàÿ. Íà ïðåäïðèÿòèè ïîä åãî ðóêîâîäñòâîì ñîçäàíî áþðî ïî êîìïüþòåðíîìó ìîäåëèðîâàíèþ òåõíîëîãè÷åñêèõ ïðîöåññîâ è ïðîâîäèòñÿ ñåðòèôèêàöèÿ ïðîèçâîäñòâà, âíåäðåíèå íîâûõ òåõíîëîãè÷åñêèõ ïðîöåññîâ (òåìîãðàôè÷åñêèé àíàëèç, ýêçîòåðìè÷åñêèé îâîãðâ, âíåäðåíèå ïðîãðåññèâíûõ è ýêîëîãè÷åñêèõ ñìåñåé). Áîëüøàÿ ðàáîòà ïðîâîäèòñÿ ïî ðåêîíñòðóêöèè è ìîäåðíèçàöèè ëèòåéíûõ öåõîâ.

Коллектив редакции и редакционный совет поздравляют
Алексея Ивановича Белякова с юбилеем!
Желаем крепкого здоровья, удачи во всех делах,
производственных успехов
и плодотворной научной деятельности.