ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 11 ноябрь 2016

Председатель редакционного совета и главный редактор
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., д.т.н., доц.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А., д.т.н., проф.
КОЛЕСНИКОВ А.Г., д.т.н., проф.

Зам. главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
БОГАТОВ А.А., д.т.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
КОТЕНОК В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф.
ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.
НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
СУБИЧ В.Н., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., д.т.н., проф.
ШЕСТАКОВ Н.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ТУТМАН Т., Dr.Yur.
ЭРКСЛЕБЕН С., Dr.-Ing.

Ответственный за подготовку и выпуск номера
СЕРИКОВА Е.А.

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63952 от 09.12.2015

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, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Лавриненко В.Ю. 90 лет со дня рождения Евгения Ивановича Семёнова (1926—2016) 3

Литейное и сварочное производства

Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Предеин В.В. Получение отливок повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей 6

Десницкий В.В., Матвеев И.А., Десницкая Л.В. Деформационные процессы при формировании ответственных стальных отливок 12

Овчинников В.В., Парфеновская О.А., Манаков И.Н., Гуреева М.А. Особенности сварки литейного сплава ВАЛ16 с деформируемым сплавом 1151 16

Кузнечно-штамповочное производство

Ларин С.Н., Леонова Е.В. Анализ формирования геометрических параметров ячеистых изделий, полученных изотермическим свободным деформированием в матрицу квадратной формы, из материалов, подчиняющихся кинетической теории пластичности и повреждаемости 25

Демин В.А., Рыжкова А.А. Влияние формы заготовки на коэффициент вытяжки цилиндрических деталей 30

Прокатно-волочильное производство

Барков Л.А., Самодурова М.Н., Латфулина Ю.С. Процессы получения полуфабрикатов и прутков из сплавов титана прессованием и прокаткой в многовалковых калибрах 35

Материаловедение и новые материалы

Гадалов В.Н., Винокуров О.В., Савельев В.И., Толкушев А.А., Ворначева И.В. Изучение быстрозакристаллизованных порошков из отходов титановых сплавов ОТ-4 и ВТ20 после электроимпульсной обработки 42

Информация

Лохман Б.В. Открытие завода холдинга «ОБО Беттерманн» в Липецке 47

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 литейного завода "Центролит"; АМУРМЕТМАШ; ООО "МЕТАЛЛИТМАШ"; АО "НПО "Сплав"

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 "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2016

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

№ 11 November 2016

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief
LAVRINENKO V.Yu.

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOTENOK V.I.
KOSHELEV O.S.
KRUK A.T.
KUKHAR' V.D.
LARIN S.N.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
NURALIEV F.A.
OVCHINNIKOV V.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATUL'SKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
TUTMANN T.
ERXLEBEN S.

This issue prepared with assistance of specialist
SERIKOVA E.A.

Journal is registered by Roskomnadzor.
The certificate of registration ПИ № ФС 77-63952, December 9, 2015.

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 Rossi" **39205**, catalogue "Pochta Rossii" **60261**) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

CONTENTS

Lavrinenko V.Yu. The 90th birthday of Evgeniy Ivanovich Semenov (1926—2016). 3

Foundry and Welding Productions

Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A., Predein V.V. Obtaining of particular dimensional accuracy castings by combined patterns from thermite and waxy sands 6
Desnitsky V.V., Matveev I.A., Desnitskaya L.V. Deformation processes at formation of critical steel castings 12
Ovchinnikov V.V., Parfenovskay O.A., Manakov I.N., Gureeva M.A. Features of welding of cast alloy VAL16 with wrought alloy 1151 16

Forging and Stamping Production

Larin S.N., Leonova E.V. Analysis of formation of geometric parameters of cellular products obtained by free isothermal deformation in square matrix from materials submitting to kinetic theory of plasticity and damageability 25
Demin V.A., Ryzhkova A.A. Influence of workpiece shape on drawing factor of cylindrical parts. 30

Rolling and Drawing Production

Barkov L.A., Samodurova M.N., Latfulina Yu.S. Obtaining processes of semi-finished products and bars from titanium alloys by pressing and rolling in multi-roll passes. 35

Physical Metallurgy and New Materials

Gadalov V.N., Vinokurov A.V., Savel'ev V.I., Tolkushev A.A., Vornacheva I.V. Study of fast-crystallized powders from wastes of titanic alloys OT-4 and VT20 after electropulse treatment 42

Information

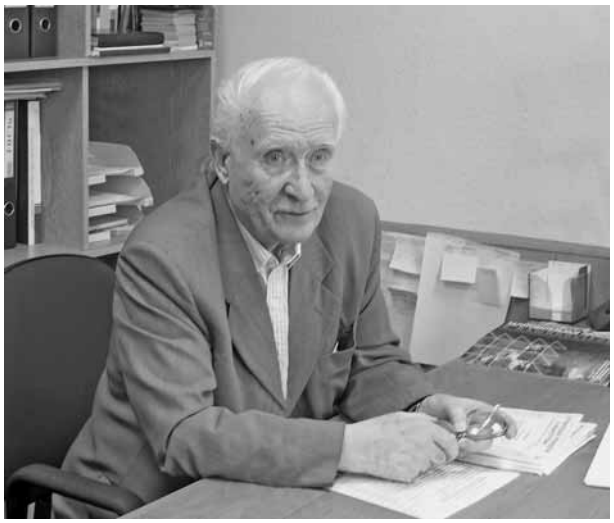
Lokhman B.V. Opening of plant of holding "OBO Bettermann" in Lipetsk 47

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"

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2016

В.Ю. Лавриненко
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)



90 лет со дня рождения Евгения Ивановича Семёнова (1926—2016)

Евгений Иванович Семёнов (1926—2016) — выдающийся советский и российский ученый в области теории и технологии обработки металлов давлением, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии Правительства РФ в области науки и техники, почетный президент отделения "Заготовительные производства в машиностроении" Академии проблем качества РФ, председатель редакционного совета и главный редактор журнала "Заготовительные производства в машиностроении", автор более 30 учебников и учебных пособий, более 350 научных публикаций и 20 авторских свидетельств и патентов, награжден рядом правительственных орденов и медалей, основатель научной школы технологии и оборудования ковки и объемной штамповки.

Евгений Иванович Семёнов родился 15 ноября 1926 г. в Москве. Среднюю школу окончил в г. Златоуст Челябинской области в годы Великой Отечественной войны. Одновременно с 1942 по 1944 г. работал слесарем на оборонном заводе и затем там же служил в аппарате военпреда Главного артиллерийского управления РККА.

В 1944 г. поступил и в 1950 г. окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. После окончания училища Е.И. Семёнов работал инженером-конструктором в КБ-1 и с декабря 1950 г. учился в аспирантуре МВТУ им. Н.Э. Баумана. Одновременно с учебой в аспирантуре он работал ассистентом на кафедре "Сопротивление материалов" МВТУ им. Н.Э. Баумана.

В 1954 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему "Определение номинальной силы кривошипного горячештамповочного пресса и массы падающих частей штамповочного молота", в которой были установлены размеры и форма очага деформации при доштамповке. Ранее считалось, что поковка деформируется целиком. В 1955 г. к такому же выводу пришел С.И. Губкин.

С апреля 1954 г. по декабрь 1954 г. работал в должности старшего инспектора отдела политехнических вузов главного управления политехнических и машиностроительных вузов Министерства высшего образования СССР, затем с декабря 1954 г. по январь 1958 г. — в МВТУ им. Н.Э. Баумана в должностях ассистента и доцента. В период с 1958 по 1959 г. являлся старшим научным сотрудником Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ) и по совместительству доцентом в МВТУ им. Н.Э. Баумана. С 1959 по 1973 г. работал в должности доцента в МВТУ им. Н.Э. Баумана. В 1969 г. Е.И. Семёнов проходил стажировку в Университете Лидса (Великобритания) в департаменте технологии машиностроения, где знакомился с научными разработками в области обработки металлов давлением и опытом крупнейших машиностроительных предприятий Великобритании.

В 1973 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему "Исследование процессов штамповки и прессования". В диссертации был предложен новый метод экспериментально-теоретического

исследования напряженного и деформированного состояния процессов с выраженными очагами пластической деформации, получены новые формулы для определения необходимых сил и выбора оборудования, разработаны новые методы обработки металлов давлением.

С марта 1973 г. по декабрь 1985 г. Евгений Иванович работал ректором Всесоюзного заочного машиностроительного института (ВЗМИ). В то же время он был заведующим кафедрой "Технология приборостроения" ВЗМИ. В этот период под руководством Е.И. Семёнова ВЗМИ по объемам научно-исследовательских работ встал в один ряд со старейшими и крупнейшими вузами страны.

С 1985 г. Е.И. Семёнов работал профессором кафедры "Технологии обработки давлением" МГТУ им. Н.Э. Баумана и одновременно с 2007 г. — профессором кафедры "Машины и технология обработки металлов давлением" Московского государственного индустриального университета (МГИУ).

Научная деятельность Е.И. Семёнова была связана с созданием и развитием теории и технологии обработки металлов давлением и разработкой на этой основе новых технологических процессов, оснастки и оборудования. Его теоретические разработки в области обработки металлов давлением легли в основу промышленных технологических процессов открытой облойной штамповки, штамповки в закрытых штампах и штампах для выдавливания. Большим преимуществом предложенных процессов являются высокое качество получаемых заготовок, экологическая безопасность, экономия металла и высокая производительность. Отличительной особенностью научной деятельности Евгения Ивановича являлись генерация новых идей и их практическая реализация. Его целеустремленность и проявленная им инициатива способствовали внедрению и дальнейшему применению этих процессов в автомобиле-, тракторо- и авиастроении, приборостроении, а также других отраслях промышленности.

Е.И. Семёновым были разработаны и внедрены оригинальные технологические процессы секционной штамповки дисков, выдавливания и высадки, обеспечивающие высокое качество и экономию высоколегированных сталей. Е.И. Семёновым совместно с группой сотрудников были разработаны и внедрены в производство гидравлические прессы уникальной конструкции силой 200 и 300 МН.

В последние годы научные интересы Евгения Ивановича лежали в области получения направленного волокнистого строения при объемной штамповке в целях повышения долговечности деталей, механики пластического деформирования трубных заготовок, а также создания экономичных процессов получения кольцевых заготовок. В настоящее время на ряде машиностроительных предприятий России находят применение предложения Е.И. Семёнова по повышению эффективности процессов ковки, объемной и листовой штамповки на молотах путем увеличения продолжительности ударного деформирования заготовок.

При этом научные интересы Евгения Ивановича не ограничивались только обработкой металлов давлением. Например, спроектированный им в 2013 г. малоинерционный медицинский молоток, обеспечивающий удар без отскока и снижение травмирования пациента, успешно применяют в настоящее время для проведения ортопедических и травматологических операций в ряде ведущих медицинских учреждений нашей страны.

За годы преподавательской работы он читал курсы по технологии горячей штамповки, технологии и автоматизации ковки, роботизации в кузнечно-штамповочном производстве, проектированию кузнечных и листоштамповочных цехов, проектированию приборостроительных заводов и цехов и другие учебные курсы.

Под его научным руководством и консультировании подготовлены и защищены более 50 кандидатских и 5 докторских диссертаций. Среди учеников Евгения Ивановича есть известные ученые, главные инженеры, главные технологи и руководители крупнейших научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий нашей страны.

Е.И. Семёнов — автор более 30 учебников и учебных пособий по специальности "Машины и технология обработки металлов давлением", среди которых учебник "Ковка и объемная штамповка" (1972 г.), учебник "Технология и оборудование ковки и объемной штамповки" (1978 г.), учебник "Робототехнологические комплексы для листовой штамповки мелких деталей" (1989 г.), учебное пособие "Теория ковки и штамповки" (глава "Объемная штамповка") (1992 г.), учебник "Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства (1999 г.), учебник "Ковка и объемная штамповка" (2011 г.), справочник "Ли-

стовая штамповка", учебное пособие "Холодная объемная штамповка" (2014 г.).

В 1985—1986 гг. в издательстве "Машиностроение" вышел четырехтомный справочник "Ковка и штамповка", председателем редакционного совета и одним из авторов которого являлся Е.И. Семёнов, а в 2010 г. — 2-е издание данного справочника, уже долгие годы являющегося настольной книгой для многих поколений ученых и технологов в области обработки металлов давлением.

Евгений Иванович постоянно вел большую общественную работу: был депутатом Куйбышевского районного совета г. Москвы, председателем комиссии по народному образованию г. Москвы, председателем секции технологии приборостроительного производства Научно-технического совета Министерства приборостроения СССР, средств автоматизации и систем управления, входил в состав секции машиностроения Научно-технического совета Минвуза СССР. Долгие годы Е.И. Семёнов вел работу в ученых и диссертационных советах в МВТУ им. Н.Э. Баумана и ВЗМИ, являлся председателем диссертационного совета в ВЗМИ.

Е.И. Семёнов являлся академиком и почетным президентом отделения "Заготовительные производства в машиностроении" Академии проблем качества РФ, председателем редакционного совета и главным редактором журнала "Заготовительные производства в машиностроении" с момента его основания в 2003 г.

В 1979 г. профессору Е.И. Семёнову было присвоено почетное звание "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР".

В 1998 г. Президиум РАН назначил Е.И. Семёнову Государственную научную стипендию в области "Материалы и химическая технология".

В 2004 г. он был удостоен Государственной премии Правительства РФ в области науки и техники за работу "Научные основы проектирования и создание гаммы тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов, технологии штамповки и автоматических линий для изготовления крупных поковок".

Е.И. Семёнов являлся лауреатом премии С.И. Мосина, почетным работником Воронежского завода тяжелых механических прессов, почетным профессором Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, награжден нагрудным значком "Почетный радист".

За заслуги в научно-педагогической деятельности Евгений Иванович награжден орденами Трудового Красного Знамени, "Знак Почета", 12 медалями, дипломом Лауреата НТТМ, пятью медалями ВДНХ, знаком "Отличник высшей школы". За участие в Великой Отечественной войне награжден медалью "За Победу над Германией".

Е.И. Семёнов являлся замечательным педагогом и учителем нескольких поколений специалистов в области обработки металлов давлением, организатором научных школ и выдающимся ученым, работы которого внесли огромный вклад в развитие отечественной науки и производства.

Евгения Ивановича отличали глубокий профессионализм, трудолюбие, порядочность, он был очень отзывчивым и доброжелательным человеком, отличающимся высокими человеческими качествами и обаянием и всегда готовым оказать поддержку и помощь. Он часто повторял известную фразу "Спешите делать добро" и сам жил по этому принципу. Многочисленные ученики Евгения Ивановича Семёнова помнят и продолжают его дело, а будущие инженеры и ученые в области обработки металлов давлением учатся по его книгам.

Владислав Юрьевич Лавриненко, д-р техн. наук

УДК 621.74.045:53.09

С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин, В.В. Предеин
(Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре)

Получение отливок повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей*

Рассмотрен технологический вариант получения стальных отливок повышенной точности с использованием термитной шихты, из которой изготовляют модельный блок с размерами, меньшими, чем размеры отливки. Блок помещают в пресс-форму, полость которой соответствует размерам и конфигурации отливки. В пресс-форму дозируют порошок воскообразного модельного материала, который напрессовывают на блок. Нанесением слоев огнеупорной суспензии на блок получают оболочковую форму, которую помещают в огнеупорный наполнитель и прокаливают. Стальной расплав в оболочке образуется в результате воспламенения материала блока и осуществления экзотермической реакции. Такая технология позволяет получать отливки сложной конфигурации без использования традиционного плавильного оборудования.

Ключевые слова: отливка; точность; оболочковая форма; экзотермическая реакция; пресс-форма.

The technological option of steel castings of high accuracy is considered. Thermite charge for the production of model unit that is smaller than the size of the casting is used. The block is placed in mould cavity which corresponds to the sizes and configuration of the casting. In mould is measured powder of waxy model material, which is pressed onto the block. Shell mould is obtained by applying of layers of the refractory slurry, shell mould is placed in refractory filler and calcined. Steel melt in the shell is formed by the ignition of the block material and exothermic reaction. This technology allows to obtain castings of complex configuration without use the traditional melting equipment.

Keywords: casting; accuracy; shell mould; exothermic reaction; mould.

Разработка технологий, направленных на решение проблемы возврата *отходов металлургического производства* (ОМП) в промышленное использование, повышения качества и сокращения длительности процесса получения литых металлоизделий является приоритетной. К числу ОМП следует отнести окалину, стружку черных и цветных металлов. Вторичное использование указанных материалов может быть сведено к извлечению из смеси компонентов ОМП железа в результате проведения алюмотермического окислительно-восстановительного процесса [1]. Из различных вариантов реализации такого процесса наиболее предпочтительными являются технологии производства готовых отливок в литейной форме из стального расплава, полученного в результате алюмотермической реакции.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН (проект 15-I-4-018) "Расчетное и опытное совершенствование процессов профилирования и высокоточного литья на основе новых модельных представлений и специальной серии вычислительных экспериментов (раздел 4)".

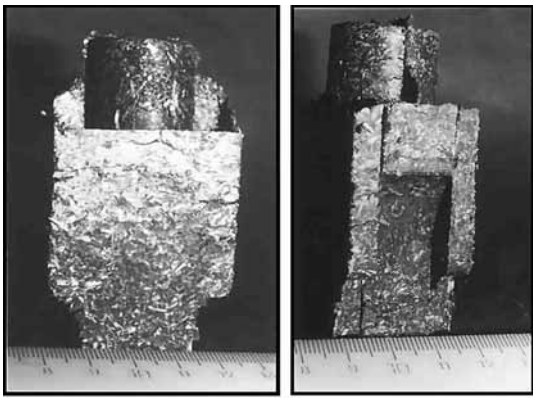
Так, для получения стальных отливок [2, 3] изготовляют *модельный блок* (МБ) прессованием термитной шихты, содержащей железоалюминиевый термит, ферросплавы и связующий материал. На МБ последовательно наносят слои огнеупорной суспензии. Каждый слой сушат и получают оболочковую неразъемную форму, которую помещают в огнеупорный наполнитель и прокаливают. Для появления расплава металла инициируют экзотермическую реакцию в форме, воспламеняя модельный блок газопламенной горелкой. Промышленная применимость данного способа обеспечивается в результате использования традиционной оснастки и доступных материалов.

Представленный способ реализует возможность использования ОМП для получения стальных отливок в результате небольшого числа технологических операций. Однако получить отливки с повышенными размерно-геометрическими параметрами таким способом затруднительно ввиду упругого отклика материала моделей и модельного блока, который появляется при уплотнении термитной смеси в ходе прессования.

Для изделий, полученных прессованием, характерно увеличение размеров, возникающее после снятия нагрузки в результате упругого отклика составляющих ее компонентов: воздуха, содержащегося в порах, и полимерных модельных материалов. При этом экспериментально установлено, что упругий отклик в массивных частях прессовки меньше, чем в тонких и больше в направлении силы прессования, чем в перпендикулярном направлении.

В ряде случаев, отмеченное выше приводит к образованию внешних дефектов на участках поверхности моделей в виде выпуклостей, трещин и локального увеличения размеров. Вводимый в состав термитной шихты пластификатор на основе воскообразных материалов решает проблему образования трещин и сколов только отчасти [3, 4].

На рис. 1 представлены модели, полученные прессованием термитной шихты, с характерными внешними дефектами. Как видно из рис. 1, поверхность таких моделей имеет трещины и сколы. Получение отливок сложной конфигурации также затруднительно ввиду неравномерности распределения плотности термитной шихты между тонкими и массивными элементами моделей и МБ. Устранение указанных недостатков такого способа получения отливок определяет необходимость учета значительных припусков на механическую обработку в проекте пресс-формы, предназначенной для получения МБ. Затратным является также механическое устранение припусков с поверхности готовой отливки.



а) *б)*

Рис. 1. Дефекты термитных моделей:
а — трещины; *б* — сколы

Необходимость совмещения технологических процессов, направленных на повышение размерно-геометрических параметров получаемых литых металлоизделий с одновременным использованием ОМП, определяют актуальность разработки такого технологического направления.

Цель работы — разработка технологии получения стальных отливок сложной пространственной конфигурации с повышенными размерно-геометрическими параметрами поверхности из расплава термитной стали, получаемого в литейной форме.

Предложена следующая последовательность процесса получения отливок повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей (рис. 2 и 3).

Модельный блок *1* (см. рис. 3) из термитной шихты с напрессованной на него корочкой *2* из воскообразной *модельной композиции* (МК), с нанесенной на МБ *1* и неразъемной оболочковой формой *3* установлен в опорном наполнителе *4*, который засыпан в литейную опоку *5*. К комбинированному МБ *1* подведена газопламенная горелка *6*.

В качестве МК целесообразно использовать парафин или воскообразные материалы на его

Рис. 2. Блок-схема технологической последовательности производства отливок

основе: ПС 50/50, ПС 70/30 [5]. Термитная шихта состоит из железоалюминиевого термита и ферросплавов [6, 7]. Часть МБ *1* из термитной шихты помещают в пресс-форму, полость которой соответствует требуемым размерам и конфигурации отливки. В связи с тем, что МБ из термитной шихты изготовляют размерами на 5...10 % меньше требуемого размера отливки, появляется возможность напрессовать корочку из МК в соответствии требуемым размерам и конфигурации отливки. Диапазон размеров 5...10 % определен опытным путем.

В пресс-форму с установленным модельным блоком дозируют порошок воскообразной МК фракции 0,1...2,5 мм в количестве, обеспечивающем пористость прессовки 10...15 % [8]. МБ может быть изготовлен прессованием термитной шихты целиком или соединяться из элементов литниково-питающей системы и моделей из термитного материала. Благодаря тому что на МБ напрессовывают корочку из воскообразной МК в соответствии с требуемым размером и конфигурацией отливки, реализуется возможность изготовления оболочковой неразъемной формы, которая обеспечивает получение отливки сложной конфигурации из термитной шихты. МБ из термитной шихты используется в качестве источника расплавленного металла для получения тела отливки, а конфигурация и поверхность последней определяются напрессованной на МБ корочкой из воскообразной МК.

Таким образом, в технологической последовательности получения отливки необходимо задействовать две пресс-формы: первая — для получения МБ из термитной шихты; вторая — для напрессовки воскообразной МК на МБ. Требованием к материалу пресс-форм является его способность к сопротивлению нагрузкам, возникающим при прессовании порошкообразных компонентов. Экспериментально установленный диапазон нагрузок, достаточный для получения прессовки из термитной шихты при ее холодном деформировании, составляет 100...140 МПа, а для напрессовки МК на основе парафина 0,5...2,5 МПа в зависимо-

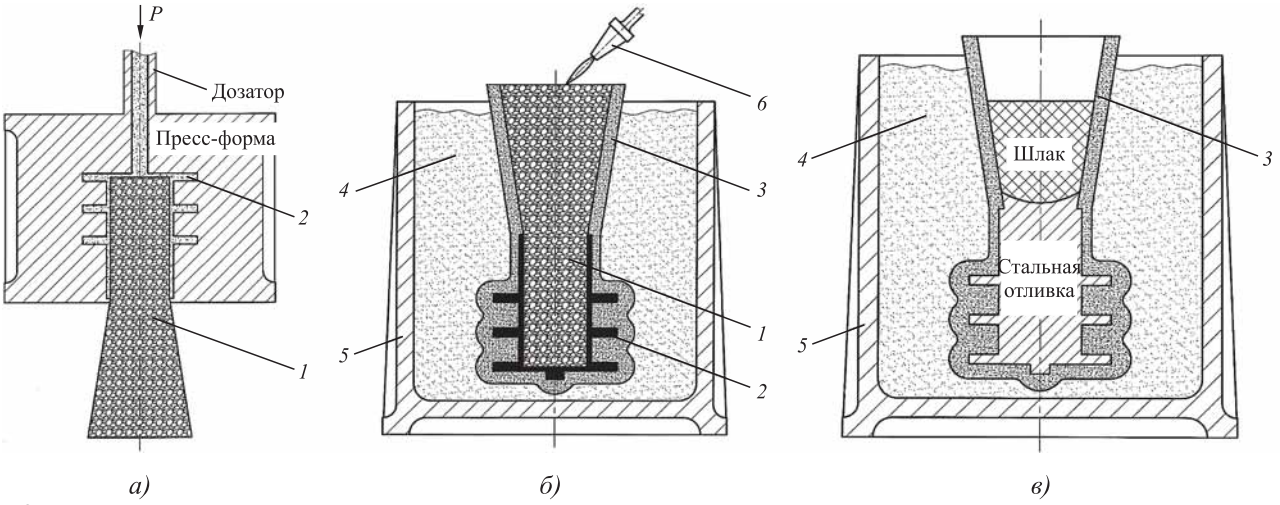


Рис. 3. Последовательность получения отливок:

а — разрез пресс-формы, в которую помещен МБ из термитной шихты для напрессовки воскообразной модельной композиции; *б* — разрез литейной опоки перед воспламенением МБ; *в* — разрез литейной опоки после формирования стальной отливки

сти от конфигурации получаемых термитных моделей и МБ в целом.

Диапазон давлений в дозаторе, необходимых для напрессовки воскообразной МК на МБ, обусловлен соотношением площади дозатора к суммарной площади сечения элементов моделей, которые необходимо напрессовать. Чем удаленнее такой участок модели от дозатора и чем меньше площадь его сечения, тем большее давление необходимо приложить для достижения этим элементам требуемой плотности.

При давлении менее 0,5 МПа воскообразная МК может не уплотниться до требуемых значений плотности или не заполнит все поднутрения пресс-формы, в которую помещают МБ из термитной шихты.

При давлении более 2,5 МПа плотность воскообразной МК может достигать состояния литого или переуплотненного, что вызывает несоответствие размеров уплотненного воскообразного модельного материала ввиду усадки или упругого отклика материала (при переуплотнении в ходе прессования повышается температура материала и после остывания прессовки в массивных узлах прессовки образуется усадка). Переуплотнение МК нежелательно также вследствие возможного нарушения размеров неразъемной оболочковой формы на стадии прокаливания МБ ввиду термического расширения материала.

Фракция воскообразной МК определяется наименьшим размером поднутрения пресс-формы и, как правило, составляет 0,1...2,5 мм. Напрессовку воскообразной МК на часть МБ, представляющую собой прибыль, не осуществляют.

Размеры полости пресс-формы, в которой формируется МБ, определяют конструктивно исходя из конфигурации и размеров отливки. При определении размеров пресс-форм целесообразно учитывать упругий отклик материалов, подвергающихся уплотнению, соответствующий определенной плотности.

Диапазон плотностей, при котором прессовки обладают технологически обусловленной прочностью, для МБ из термитной шихты равен 3300...3600 кг/м^3, а для воскообразной МК 820...840 кг/м^3. Для термитной шихты при деформировании до указанной плотности объемный упругий отклик прессовок по данным [8] составляет 2,75...10 %, а для воскообразной МК 0,4...0,5 %. Для сокращения упругого отклика прессовок поверхности разъемов пресс-формы необходимо совмещать со скоростью 0,2...1 мм/с, а по завершении прессования уплотняемый материал в пресс-форме выдерживают в нагруженном состоянии не менее 10 мин.

МБ из термитной шихты с напрессованными элементами из воскообразного материала в виде корочки извлекают из пресс-формы. На воскообразную корочку, напрессованную на МБ, наносят слои суспензии из связующего раствора и огнеупорного материала (преимущественно графита), формируя неразъемную оболочковую форму. Слои суспензии для их упрочнения и лучшей взаимной связи обсыпают графитом и сушат. Число наносимых слоев различно — от 3—4 до 20 и более в зависимости от металлоемкости и назначения отливок.

Далее МБ с готовой оболочковой неразъемной формой помещают в опоку и формуют в опорный наполнитель (см. рис. 3, *б*). Опоку прокаливают для удаления органических остатков модельных и связующих материалов. Заключенные в неразъемной оболочке материалы МБ и напрессованной МК подвергаются тепловому воздействию, что проявляется в изменении их объемов в результате термического расширения, что может привести к нарушению целостности оболочки. Важным на этой стадии является обеспечение стабильности размерно-геометрических параметров неразъемной оболочковой формы.

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости деформаций от температуры материалов МБ плотностью 3500 кг/м^3 и МК плотностью 780 кг/м^3, что соответствует пористости

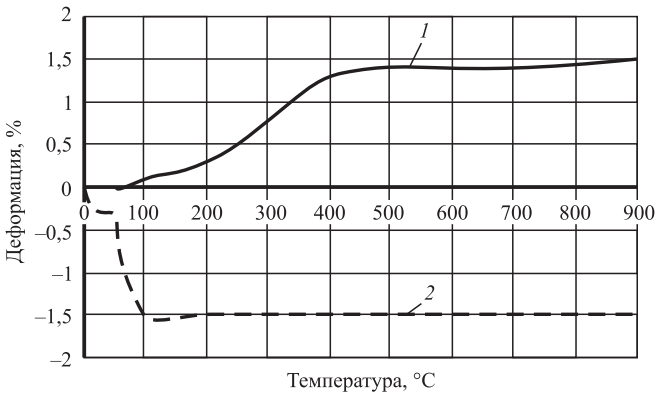


Рис. 4. Экспериментальные зависимости деформаций от температуры материалов МБ (*1*) и МК (*2*)

15 %. Из рис. 4 видно, что в интервале температур 25...900 °С деформация материала МБ, приводящая к его расширению, достигает 1,5 %.

Установлено, что термическое расширение материала МК при расплавлении компенсируется пористостью и обусловливает уменьшение их объема в зависимости от последней [8].

Деформацию МБ, полученного прессованием термитной смеси, регистрировали посредством измерения расширения при нагреве МБ до 1000 °С [9]. В рабочую камеру нагревательной печи помещали МБ из термитной шихты, к которому (через специальные отверстия в рабочей камере печи) подводили кварцевые толкатели, присоединенные с противоположной стороны к микрометрам индикаторного типа. В результате нагрева МБ расширяется, отклонение стрелок микрометров регистрирует деформацию МБ в продольном и поперечном направлениях.

Коэффициент температурного расширения (КТР) МБ при различных температурах определяли по формуле

$$KTP(T_i) = \frac{D_{\text{МБ}i} - D_{\text{МБ}}^{\text{нач}}}{D_{\text{МБ}}^{\text{нач}} T_i} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где $D_{\text{МБ}}^{\text{нач}}$, $D_{\text{МБ}i}$ — начальный объем МБ и объем МБ при температуре нагрева T_i соответственно.

КТР для МБ из термитной шихты, рассчитанный согласно (1) в интервале температур 0...1000 °С, не превышает 1,5 %.

При объеме напрессованной воскообразной МК 10 % на МБ расширяющего воздействия на стенки неразъемной оболочковой формы оказываться не будет.

Воскообразная МК при температуре выше 60 °С находится в расплавленном состоянии. Из рис. 4 видно, что МК с пористостью 15 % при условии толщины напрессованной воскообразной корочки 10 % от площади поперечного сечения комбинированного МБ, находясь в расплавленном состоянии, не оказывает влияния на деформацию оболочки. Материал МБ в интервале температур 60...900 °С имеет возможность расширяться при нагреве во время прокаливания, также не деформируя оболочку.

После этого в горячей оболочковой форме, прогретой до 900 °С и расположенной в опоке, осуществляют воспламенение термитного материала литниково-питающей системы МБ газопламенной горелкой. Процесс горения протекает быстро, последовательно распространяясь на весь объем термитного материала, и проходит по известной экзотермической реакции [1].

Термитная шихта состоит из окалины, восстановителя и добавок. Окалина содержит оксиды железа с различной степенью окисленности: FeO, Fe_2O_3 и Fe_3O_4. Так как одним из продуктов реакции будет Al_2O_3, то в общем виде для Fe_nO_m формула прохождения экзотермической реакции выглядит следующим образом:

$$2m\text{Al} + 3\text{Fe}_n\text{O}_m = m\text{Al}_2\text{O}_3 + 3n\text{Fe}. \qquad (2)$$

В неразъемной оболочковой форме образуется расплав стали, который затем затвердевает, формируя стальную отливку (см. рис. 3, *в*). Требуемый химический состав стали обеспечивается вводимыми в термитную шихту добавками и ферросплавами [1]. Содержание добавок и ферросплавов в термитной шихте определяют по формуле

$$m_{\text{ф}} = \frac{m_{\text{т}}\varphi(\text{Э} - \text{Э}_{\text{т.с}}) + m_{\text{н}}(\text{Э} - \text{Э}_{\text{н}}\varphi)}{\text{Э}_{\text{ф}}\varphi_{\text{ф}} - \text{Э}}, \qquad (3)$$

где $m_{\text{ф}}$ — масса ферросплава, кг; $m_{\text{т}}$ — масса термита, кг; φ — выход термитной стали; Э, $\text{Э}_{\text{т.с}}$, $\text{Э}_{\text{ф}}$ и $\text{Э}_{\text{н}}$ — среднее содержание химического элемента соответственно в металле прибыли, исходной термитной стали, ферросплаве и наполнителе, %; $m_{\text{н}}$ — масса наполнителя, кг.

Для производства партии отливок с требуемым химическим составом необходима коррекция состава исходных компонентов в зависимости от условий предварительного получения конкретной отливки (материала и габаритных размеров оснастки, температуры подогрева формы, скорости реакции).

Шлак, образовавшийся в процессе прохождения термитной реакции, всплывает в полном объеме в верхнюю часть оболочковой формы. Стальная отливка после охлаждения извлекается из оболочковой формы традиционным способом.

Таким образом, использование комбинированных литейных моделей и МБ из алюмотермитных и воскообразных смесей направлено на вовлечение в производственный цикл ОМП. Рассмотренный принцип формообразования позволяет производить стальные отлив-

ки сложной пространственной конфигурации с более высокими размерно-геометрическими параметрами поверхности (в сравнении с отливками, полученными по прессованным термитным моделям [3]) из расплава термитной стали, получаемого в литейной форме.

Точность получаемых отливок регламентируется размерными и геометрическими параметрами напрессованной на модельный блок из термитного материала воскообразной корочки. Качество внешней поверхности корочки определяется качеством обработки формообразующей полости пресс-формы, в которой происходит напрессовка воскообразной корочки на МБ. (Внешний вид полученных отливок типа "корпус" представлен в [3].)

Технико-экономические показатели представленного технологического процесса заключаются в устранении использования традиционного плавильного оборудования; утилизации ОМП; сокращении расхода шихтовых материалов для получения металлоизделий из сортовой стали до 50 %, получении металлоизделий с прогнозируемыми свойствами, в том числе, вне специализированных производственных подразделений. Ввиду того, что продолжительность экзотермической реакции незначительна, возможно снижение времени получения металлоизделий в 1,5—2 раза. Себестоимость шихтовых материалов в 1,5—3 раза ниже по сравнению с традиционными способами получения литой продукции.

В результате внедрения технологии возможно получение экономического эффекта в размере до 20 % стоимости сортовых металлоизделий без значительных затрат на переоборудование производственных помещений, что позволит получить существенный социально-экономический эффект при внедрении данной технологии на предприятии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Малоотходная** технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями / В.А. Новохацкий, А.А. Жуков, Ю.И. Макарычев. М.: Машиностроение, 1986. 64 с.
2. **Пат. 2367539 РФ.** Способ получения стальных отливок / И.Г. Сапченко, О.Н. Комаров, С.Г. Жилин. Заявл. 20.07.2006; опубл. 27.01.2008.
3. **Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н.** Технологические предпосылки повышения эффективности литья по выплавляемым моделям // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 8—11.
4. **Комаров О.Н., Сапченко И.Г., Жилин С.Г.** Технологические особенности процессов прессования термитной смеси для экзотермического переплава // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 4. С. 33—37.
5. **Литье** по выплавляемым моделям / под общ. ред. В.А. Озерова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1994. 448 с.
6. **Термохимические** процессы получения отливок из термитной шихты в графитовых оболочковых формах / О.Н. Комаров, И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, В.В. Предеин // Металлургия машиностроения. 2013. № 6. С. 33—37.
7. **Особенности** получения литья из термитных сталей / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, В.В. Предеин // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 8. С. 3—6.
8. **Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Евстигнеев А.И.** Об особенностях проектирования и использования оснастки при изготовлении пористых выплавляемых моделей // Литейное производство. 2010. № 2. С. 26—31.
9. **Сапченко И.Г., Комаров О.Н., Жилин С.Г.** Использование термитных материалов в технологиях получения стальных отливок. Владивосток: Дальнаука, 2008. 166 с.

Сергей Геннадьевич Жилин, канд. техн. наук,
zhilin@imim.ru;
Олег Николаевич Комаров, канд. техн. наук;
Александр Александрович Соснин, канд. техн. наук;
Валерий Викторович Предеин

УДК 621.74:672.1

В.В. Десницкий, И.А. Матвеев, Л.В. Десницкая
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Деформационные процессы при формировании ответственных стальных отливок

Выполнен экспериментально-теоретический анализ процесса разрушения литых металлических твердых тел под нагрузкой. Разрушение литых деталей рассмотрено не как единовременное критическое событие, а как временной процесс постепенного накопления деструкций материала в виде последовательного разрыва структурных связей. Показано, что снижение опасности образования горячих трещин происходит по механизму сверхпластичности. Высокая пластичность металла и отсутствие пор снижают вероятность образования усталостных трещин.

Ключевые слова: стальные отливки; горячие трещины; сверхпластичность; усталостные трещины; фазовые превращения; микроструктура.

The experimental and theoretical analysis of destruction process of cast metal solid bodies under loading is carried out. Destruction of cast parts is considered not as single critical event and as time process of gradual accumulation of destructions of material in the form of consecutive rupture of structural communications. It is shown that decrease in danger of formation of hot cracks happens on the superplasticity mechanism. High plasticity of metal and lack of time reduces probability of formation of fatigue cracks.

Keywords: steel castings; hot cracks; super plasticity; fatigue cracks; phase transformations; microstructure.

Производство крупных стальных отливок "рама боковая" и "балка надрессорная" для тележек грузовых вагонов с точки зрения сложности изготовления и требований к качеству заслуживает особого внимания.

Наиболее проблемной для литейщиков является отливка "рама боковая" (рис. 1, см. обложку). Конструкция изделия является не технологичной. Отливка имеет большое количество закрытых термических узлов, массивных приливов и резких переходов от тонких сечений стенок к толстым и от коробчатых сечений к цельнолитым стенкам. Это обусловливает повышенную вероятность формирования дефектов в виде усадочных раковин и трещин различного происхождения.

Толщина стенки буксового проема рамы плавно увеличивается в сторону внутреннего угла R = 55 мм, поэтому именно здесь при затвердевании образуется сначала тепловой узел, а затем — раковина. Поскольку рама имеет конструкцию короба, в области R = 55 мм формируются два таких узла: один сверху, другой снизу (рама заливается в горизонтальном положении).

Питание верхнего узла не представляет проблемы, поскольку над ним (или рядом с ним) можно поставить прибыль соответствующих размеров (обычную или экзотермическую). Прибыль обеспечит питание этого узла, а также и центральной (опорной) части буксового проема.

Данная задача была решена с помощью моделирования в системе ProCAST, в результате чего проблемным остался только нижний тепловой узел (рис. 2, см. обложку). Его питание крайне затруднено, так как стенка, через которую питается узел, имеет постоянную толщину по высоте при значительной протяженности (~15 см). Чтобы пропитать протяженную область без изменения ее геометрии (например, создания уклона стенки по высоте), требуются дополнительные технологические приемы, например, установка холодильников в нижний тепловой узел [1].

Цель работы — поиск технического решения, обеспечивающего гарантированное получение качественной литой заготовки "рама боковая", включая нижний тепловой узел.

Методика исследования. Недостатки апробированной конструкции литой заготовки приходится исправлять новыми технологическими решениями. Их поиск и отработка для литья в песчано-глинистые формы проводились десятилетиями. В результате применения внутренних и внешних холодильников,

противоусадочных ребер, стержней с различной податливостью освоено производство заготовок удовлетворительного качества.

На основе компьютерного моделирования разработан технологический процесс изготовления отливки "рама боковая" вакуумно-пленочной формовкой, который позволяет изготовлять отливки в соответствии с требованиями ТУ УВЗ-50-41—2002 ДТ. Отработка и внедрение данного технологического процесса проведены в условиях опытного участка ВПФ ООО "ВКМ-Сталь" (г. Саранск) [2].

Однако кратковременные механические свойства стали в образцах, вырезанных из отливки, не отражают прочность отливки в целом, а ресурс больше зависит от пластичности материала, а не от предела прочности [3]. Механизм потери (исчерпания) несущей способности литой детали является принципиально другим.

В 1960-е годы С.Н. Журковым [4, 5] было сформулировано представление о том, что временная зависимость прочности характерна для всех твердых тел при самых различных условиях испытания и отражает кинетическую, термофлуктуационную природу разрушения последних. Разрушение твердых тел под нагрузкой рассматривается при этом не как единовременное критическое событие, а как временной процесс постепенного накопления деструкций материала в виде разрыва структурных связей.

Процесс разрушения складывается из двух стадий: зарождения трещины и ее роста. Для оценки длительности каждой из этих стадий используются различные аналитические зависимости. Длительность первой стадии определяется уровнем напряжений и упругопластических деформаций и заканчивается образованием трещины. Основное внимание уделяется трещинам средних размеров, которые могут быть обнаружены в элементах конструкций современными средствами дефектоскопии.

Закономерности роста трещин исследует механика разрушения. В случае низких нагрузок и хрупких материалов, когда у вершины трещины доминирует поле упругих напряжений и деформаций, разрушение определяется закономерностями линейной механики разрушения [6]. В области высоких нагрузок и для пластичных материалов используется аппарат нелинейной механики разрушения.

В литом металле зарождение усталостных трещин происходит от усадочной поры и дальнейшее ее продвижение ускоряется при наличии пор [7]. Продвижение усталостной трещины, прежде всего, зависит от свойств металла в отливке и характеризуется критерием интенсивности напряжения, а сам рост трещины происходит при напряжениях ниже предела прочности материала. Процесс разрушения прогнозируется этими критериями, которые базируются на моделях поведения сплошной среды.

Важным фактором является расположение усадочных пор, обусловленное усадкой. Схема процесса предупреждения усадочных пустот не входит в понятие моделирования затвердевания отливки, которое только фиксирует их наличие (рис. 2, см. обложку). Полной схемой обеспечения плотного металла является автоматизированное проектирование технологии [8, 9], где рассчитывается распределение средств его реализации.

Принципы работы [8] могут быть реализованы с различной степенью точности для отливок различного вида и назначения. При этом будет осуществлен оптимальный технологический вариант в соответствии с заданными техническими требованиями. Можно ожидать, что при полном расчете [10] выявленная эффективная область получения плотных отливок условия затвердевания близка к стандартной отливке *Barber* [11].

В работе [12] показано, что до 2000 г., проблема излома отливок "рама боковая" не являлась такой актуальной, как в настоящее время. На рис. 3 (см. обложку) приведена фотография сечения отливки из стали 20Л, эксплуатировавшейся без излома в составе вагона в течение 32 лет [12]. В термическом узле отливки имеется увеличенная усадочная раковина, которая не привела к излому детали. При осмотре внутренней поверхности отливок оказалось, что в местах соединения стенок отсутствуют ребра жесткости, которые обычно в большом количестве устанавливаются в подобных отливках из стали 20ГФЛ. Это свидетельствует о повышенной пластичности стали 20Л.

Анализ процесса кристаллизации отливки. Попытка найти простое решение рассматриваемой технической задачи по типу "отверточной технологии" оказалась неудачной из-за недостатка специалистов-литейщиков высокой квалификации. Такая же проблема существует и в Германии. Эта наукоемкая специальность

учитывает множество протекающих сложным образом процессов и зависит от множества факторов. Например, наличие изломов боковых рам вызывает ошибочное стремление повысить предел прочности стали. Однако это увеличивает скорость продвижения усталостной трещины вследствие увеличения хрупкой составляющей при разрушении металла в ее вершине [7]. При повышении пластических свойств, наоборот, не образуется скопления дислокаций в вершине усталостной трещины, которые снижают скорость продвижения усталостной трещины, препятствуя ее росту. Необходимо учитывать, что процесс зарождения и роста усталостных трещин происходит при напряжениях ниже предела прочности стали.

Наличие в отливке усадочных пустот создает условия для возникновения и роста усталостных трещин. Выше было показано, что в рассматриваемой сложной отливке трудно обеспечить качественное питание формы, несмотря на наличие прибылей. Вблизи прибылей обычно металл плотный. При удалении от прибылей питающий металл встречает сопротивление продвижению и не может компенсировать усадочные пустоты.

В то же время процесс затвердевания стали с перитектикой оказывается намного сложнее. В этом случае в материале при охлаждении происходят не только процессы перехода металла из жидкого состояния в твердое, но и протекает фазовое превращение феррита в аустенит. Протекание двух физических процессов позволяет достичь более высокого качества отливки. Рассмотрим это на примере первичной кристаллизации сталей с перитектическим превращением (рис. 4).

Сплав 1 содержит 0,05 % мас. С. Кристаллизация сплава начнется в точке *a* и закончится в точке *b* с образованием δ-твердого раствора. Углерод повышает температуру аллотропического превращения железа $\delta \leftrightarrow \gamma$. Эта перестройка кристаллической решетки твердого раствора происходит при охлаждении сплава между точками *c* и *d*, когда одновременно сосуществуют два разных типа твердого раствора (состав δ-раствора изменяется по линии *HN*, а γ-раствора — по линии *JN*). Ниже точки *d* сплав охлаждается в аустенитном состоянии.

Сплав 2 содержит 0,13 % мас. С. Кристаллизация δ-раствора начнется в точке *e* и закончится в точке *k*. При температуре 1499 °С происходит перитектическое превращение:

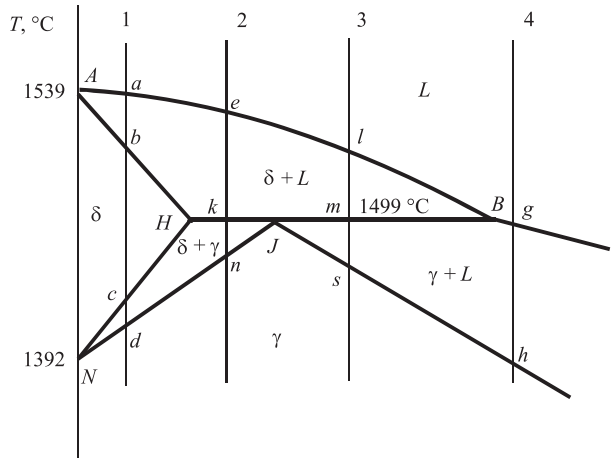


Рис. 4. Левый верхний угол диаграммы состояния Fe—C: первичная кристаллизация сталей

$$\delta_H + L_B \rightarrow \gamma_J.$$

При охлаждении сплава от точки *k* до точки *n* идет перестройка кристаллической решетки $\delta \rightarrow \gamma$, и ниже точки *n* сплав охлаждается в аустенитном состоянии.

Сплав 3 содержит 0,25 % мас. С. Кристаллизация δ-раствора начинается в точке *l* и заканчивается в точке *m*. При температуре 1499 °С в сплаве протекает перитектическое превращение, по окончании которого в избытке оказывается жидкая фаза. При охлаждении сплава от точки *m* до точки *s* продолжается кристаллизация аустенита из жидкой фазы. Ниже точки *s* сплав охлаждается в аустенитном состоянии.

Сплав 4 содержит 0,6 % мас. С. Кристаллизация сплава начинается в точке *g* с образования аустенита и продолжается до точки *h*. Ниже этой точки сплав охлаждается в аустенитном состоянии.

Рассмотренная схема предполагает, что кристаллизация происходит в равновесных условиях. Однако реальные условия кристаллизации и добавление легирующих элементов в состав стали изменяют ее вид. В масштабе всей отливки происходит сложная кристаллизация, а превращение $\delta \rightarrow \gamma$ вызывает механическое сокращение затвердевшей внешней части затвердевающей отливки.

При сокращении внешнего контура детали при наличии незатвердевшей центральной части происходит выжимание оставшейся жидкости в тело отливки по схеме литья выжиманием. Жидкость в этом случае хорошо

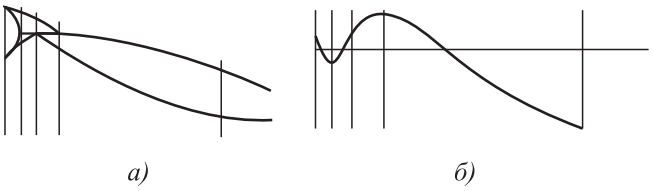


Рис. 5. Схематическое изображение:

а — диаграмма состояния, содержащая перитектическое превращение; *б* — изменение коэффициентов усадки стали при затвердевании [13]

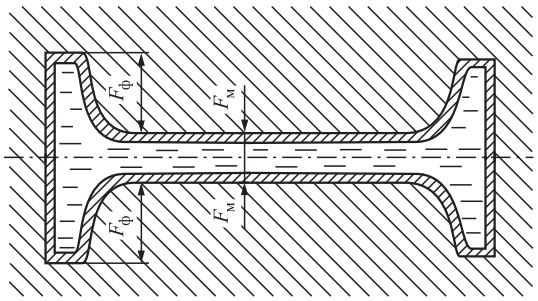


Рис. 6. Схема формирования дополнительно сжимающейся наружной корки затвердевающего металла [13]

компенсирует усадочные поры. Таким образом, происходит дополнительное питание, где внешне эти явления проявляются как локальное уменьшение коэффициента усадки при переходе из жидкого состояния в твердое.

На рис. 5 показаны участок диаграммы состояния с изображением перитектики и изменение общего коэффициента усадки при затвердевании, который имеет минимум при содержании в стали 0,20 % мас. С [13].

Рассмотренные явления приводят к тому, что в отливке "рама боковая" образование пор компенсируется по механизму литья выжиманием (рис. 6). Снижение вероятности образования горячих трещин, по-видимому, происходит по механизму сверхпластичности. Высокая пластичность металла при эксплуатации отливки и отсутствие пор снижают вероятность образования усталостных трещин.

Аналогичные экспериментальные результаты получены при литье деталей из стали 1Х18Н8Т, также претерпевающей перитектическое превращение при кристаллизации [14].

Заключение. Анализ процесса формирования дефектов в крупных стальных отливках "рама боковая" показал, что их предотвращение возможно не только в результате оптимизации технологии литья, но и при учете особенностей кристаллизации металла. Протекание перитектического превращения в стали при кристаллизации косвенно обеспечивает дополнительное питание центра отливки и уменьшение усадки и пористости. Следствием этого является снижение вероятности образования микротрещин при затвердевании отливки и эксплуатации детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Излом** боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов / А. Монастырский, В. Бубнов, С. Котенко, В. Балакин // CADMASTER. 2012. № 5. С. 60—65.

2. **Пирайнен В.Ю., Пономаренко Г.М., Глебов С.М.** Новое в проектировании технологии изготовления отливки "Рама боковая". СПб.: ЗАО "ЦНИИМ-Инвест", 2010. 35 с.

3. **Кондратьев С.Ю.** Механические свойства металлов: учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т, 2011. 128 с.

4. **Журков С.Н., Нарзуллаев Б.Н.** Временная зависимость прочности твердых тел // ЖТФ. 1953. Т. 23. № 10. С. 1677—1685.

5. **Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.Т.** Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.

6. **Десницкий В.В., Кратович Л.Ф., Креймерман Г.М.** Влияние дефектов литого металла и микроструктуры на трещиностойкость // Пути повышения надежности и долговечности отливок: сб. Киев: КДНТП, 1990. С. 98—104.

7. **Горынин В.И., Кондратьев С.Ю.** Механические свойства металлов. Усталость металлов: учеб. пособие для студентов вузов. СПб.: Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т, 2005. 91 с.

8. **Десницкий В.В.** Автоматизированное проектирование технологии изготовления отливок. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1987. 163 с.

9. **Десницкая Л.В.** Моделирование формирования крупных стальных отливок в песчаной форме. СПб.: СЗПИ, 2000. 137 с.

10. **Основы** информационных технологий и бизнеса в литейном производстве / Е.О. Ольховик, С.М. Глебов, В.Ю. Пирайнен, И.А. Матвеев, С.И. Рыбачук, В.П. Суханова, Ю.М. Семенова. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2010. 160 с.

11. **Десницкий В.В., Ольховик Е.О.** Исследование влияния размерной точности отливки боковой рамы тележки грузового железнодорожного вагона на ее прочность // Вестник машиностроения. 2014. № 10. С. 47—49.

12. **Воронин Ю.Ф.** Новая методология и комплекс автоматизированных систем для повышения качества отливок из чугуна и стали // Литье Украины. 2013. № 8. С. 156—161.

13. **Гуляев Б.Б.** Теория литейных процессов. М.—Л.: Машиностроение, 1976. 214 с.

14. **Десницкий В.В., Ольховик Е.О., Десницкая Л.В.** Особенности формирования отливок из хромоникелевых сталей. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2006. 124 с.

Владимир Владимирович Десницкий, д-р техн. наук;
Игорь Александрович Матвеев, канд. техн. наук,
matvia@mail.ru;
Людмила Владимировна Десницкая, канд. техн. наук

УДК 621.791.02

В.В. Овчинников, О.А. Парфеновская, И.Н. Манаков, М.А. Гуреева
(Московский политехнический университет)

Особенности сварки литейного сплава ВАЛ16 с деформируемым сплавом 1151

Приведены результаты исследования свойств сварных соединений литейного алюминиевого сплава ВАЛ16 с деформируемым сплавом 1151. Прочность сварного соединения ВАЛ16 + 1151 составляет 80 % прочности основного материала (сплава 1151) при аргонодуговой сварке. Прочность сварных соединений указанных сплавов при сварке трением с перемешиванием повышается до 87...90 % от прочности основного металла. Коррозионная стойкость сварных соединений из ВАЛ16 и в сочетании с деформируемым сплавом 1151 при сварке плавлением пониженная.

Ключевые слова: литейные алюминиевые сплавы; деформируемые алюминиевые сплавы; аргонодуговая сварка; сварка трением с перемешиванием; присадочная проволока; прочность соединений; восстановленная прочность; коррозионная стойкость.

Results of study of properties of welded joints of cast aluminum alloy VAL16 with wrought alloy 1151 are presented. The strength VAL16 + 1151 welded joint is 80 % of strength of the basic material (alloy 1151) at argon-arc welding. The strength of the welded joints these alloys at friction stir welding rises to 87...90 % of the strength of the base metal. Corrosion resistance of welded joints from VAL16 and in combination with wrought alloy 1151 at fusion welding reduced.

Keywords: casting aluminum alloys; wrought aluminum alloys; argon-arc welding; friction stir welding; filler wire; strength of joints; restored strength; corrosion resistance.

Введение. В настоящее время при изготовлении самолетов перспективным направлением является создание литосварных узлов, в которых часть деталей изготовляют из литейных алюминиевых сплавов, а другую часть — из деформируемых алюминиевых сплавов. Для таких узлов актуальным является исследование свариваемости литейных сплавов с деформируемыми, определение уровня прочностных и коррозионных свойств соединений, а также правильный выбор и совершенствование присадочных материалов [1—5].

Литейный сплав ВАЛ16 относится к системе сплавов Al—Mg, рекомендуется для изготовления силовых узлов сварных конструкций в сочетании с деформируемыми алюминиевыми сплавами АМг6 и 1420, работающими в интервале температур от −70 до +120 °С (100 ч) и до 140 °С (10 ч) во всех климатических условиях.

Цель работы — исследование свариваемости и свойств сварных соединений сплава ВАЛ16 с деформируемым теплопрочным сплавом 1151 при сварке плавлением (автоматическая аргонодуговая сварка) и сварке трением с перемешиванием.

Методика проведения экспериментов. Отлитые заготовки из сплава ВАЛ16 были обработаны по толщине в размер 3,0 мм с параметром шероховатости Ra = 3,2 мкм. Заготовки из сплава 1151 после раскроя на гильотинных ножницах по торцам были обработаны на фрезерном станке с Ra = 3,2 мкм.

После механической обработки листовые заготовки подвергали общему химическому травлению в щелочи с последующим осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты. Непосредственно перед сваркой торцы свариваемых кромок у поверхности с лицевой и обратной сторон шва на расстоянии 15 мм от торцов зачищали шабером.

Литые заготовки со всех сторон обрабатывали механически, поэтому общему химическому травлению их не подвергали. На литых заготовках свариваемые кромки непосредственно перед сваркой зачищали шабером.

Сварочную проволоку подвергали химическому травлению в щелочи с последующим осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты.

Автоматическую аргонодуговую сварку выполняли на установке типа УСПО методом

сварки вращающимся электродом на технологической подкладке из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т с формирующей канавкой радиусной формы. Питание дуги осуществлялось от источника "Формаж-315".

Автоматическую аргонодуговую сварку выполняли по режиму: ток сварки 140 А; скорость сварки 24 м/ч; расход аргона 7 л/мин для образцов толщиной 2,5 мм. Частота вращения неплавящегося вольфрамового электрода 90...110 об/мин. В процессе сварки литой заготовки с заготовкой из деформируемого материала ось вращения электрода смещали от стыка на величину до 1,0 мм в сторону деформируемого сплава 1151.

Сварку трением с перемешиванием осуществляли на лабораторной установке, изготовленной на базе вертикального фрезерного станка с ЧПУ и дополнительно оснащенного индикатором вертикального перемещения фрезерной головки. Для сварки применяли инструмент, выполненный из стали Р18 со штифтом конусообразной формы и винтовой линией [6].

Образцы из основного металла и сварных соединений для механических испытаний, испытаний на усталость, металлографические исследования и коррозионные испытания изготовляли в соответствии с ГОСТ 1497—84, ГОСТ 14019—2003, ГОСТ 6996—66, ГОСТ 9.021—74, ГОСТ 9.019—74.

Выбор марки присадочной проволоки для сварки плавлением разноименных сочетаний проводили из условия склонности к образованию горячих трещин по методике МВТУ. По этой методике склонность сплава к образованию горячих трещин изучают определением максимального значения темпа деформации свариваемого образца, подвергаемого принудительному деформированию на испытательной установке ЛТП-1-6.

Пластины из литейного сплава ВАЛ16 в разноименных сочетаниях с деформируемым сплавом 1151 сваривали ручной и автоматической аргонодуговой сваркой с присадочными проволоками Св.АМг63, Св.1177 диаметром 2,0 мм при автоматической сварке и 3,0 мм — при ручной.

Испытания на усталость сварных образцов, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой, проводили на испытательной машине 300-1 на изгиб с частотой нагружения 2800 циклов/мин с базой испытания 10^7 циклов.

Сварные пластины сочетания сплавов ВАЛ16 + 1151 подвергали трехкратной подварке ручной аргонодуговой сваркой. Каждую последующую подварку выполняли после удаления усиления и проплава заподлицо с основным материалом.

Непосредственно перед сваркой свариваемые кромки после химического травления были зашабрены по торцам и прилегающим сторонам на расстоянии 10...12 мм с двух сторон. Образцы сваривали в клавишном приспособлении на технологической подкладке без защиты и с защитой обратной стороны шва.

Из образцов изготовляли микрошлифы в поперечном разрезе сварного соединения. Структуру изучали на металлографическом микроскопе XJP-11 фирмы NDTtester при различных увеличениях. Шлифы травили в реактиве Келлера.

Механические свойства исследуемых материалов приведены в табл. 1.

Результаты исследований и их обсуждение. По методу МВТУ проводили количественную сравнительную оценку сопротивляемости сочетания горячим трещинам по показателю технологической прочности. При заданном термическом цикле сварки за показатель технологической прочности $A_{кр}$ приняли значение скорости деформации, при котором в испытуемом образце начинают появляться трещины. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

1. Механические свойства исследуемых сплавов толщиной 3,0 мм

Марка сплава	Предел прочности $\sigma_в$	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение δ, %	Угол изгиба α, °	Ударная вязкость *KC*U, Дж/см^2
	МПа				
ВАЛ16	258...315* / 287	153...187 / 170	19,0...21,0 / 20	60...72 / 64	20,4...38,0 / 29,4
1151	438...466 / 446	343...368 / 349	22,9...24,3 / 23,8	63...65 / 64	9,7...11,7 / 10,7

* В числителе приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе — среднее значение.

2. Результаты пробы МВТУ различных сочетаний сплавов

Сочетание сплавов	Марка присадочной проволоки	$A_{кр}$, мм/мин
ВАЛ16 + ВАЛ16	Св.АМг63	3,17
1151 + 1151	Св.1177	2,55
	Св.АМг63	3,42
ВАЛ16 + 1151	Св.1177	1,59
	Св.АМг63	2,34

При проведении пробы применяли сварочную проволоку Св.1177 и Св.АМг63 при сварке сочетания сплавов 1151 + ВАЛ16. При сварке образцов проволокой Св.1177 получен показатель технологической прочности $A_{кр}$ = 1,59 мм/мин, при сварке образцов проволокой Св.АМг63 — $A_{кр}$ = 2,34 мм/мин. По этой пробе предпочтение следует отдать проволоке Св.АМг63.

По результатам рентгеновского контроля установлено, что сварные соединения имеют мелкую пористость диаметром 0,1...0,2 мм по линии сплавления основного и наплавленного металла со стороны сплава ВАЛ16.

Из сварных соединений после сварки и технологических нагревов при температурах 110 °С, 10 ч; 250 °С, 3 ч и 350 °С, 3 ч были изготовлены образцы для испытаний статическим растяжением, статическим изгибом и на удар. Полученные результаты испытаний приведены в табл. 3 и 4.

Из представленных данных видно, что сварные соединения ВАЛ16 + 1151, выполненные с присадочной проволокой Св.АМг63, имеют

3. Механические свойства образцов основного металла и сварных соединений исследуемых сплавов

Сочетание свариваемых сплавов	Способ сварки	Марка присадочной проволоки	Характеристика образца	$\sigma_в$, МПа	α, °	KCU, Дж/см^2	Характер разрушения образца при испытаниях
ВАЛ16	—	—	Основной металл	258...315 / 287	60...72 / 64	20,4...38,3 / 29,4	—
1151	—	—		438...466 / 446	62...64 / 63	9,7...11,7 / 10,7	—
1151 + 1151	АИНп	Св.АМг63	Сварное соединение	330...348 / 343	42...50 / 46	2,7...3,5 / 3,1	По ЛС
1151 + 1151		Св.1177		380...398 / 393	52...60 / 56	2,2...2,8 / 2,5	
1151 + 1151	СТП	—		408...416 / 410	162...170 / 165	8,7...10,7 / 9,7	По ОМ
ВАЛ16 + ВАЛ16	АИНп	Св.АМг63		239...265 / 246	42...51 / 46	21,7...23,6 / 22,3	
ВАЛ16 + ВАЛ16	СТП	—		298...305 / 297	140...152 / 144	15,4...18,3 / 17,4	
ВАЛ16 + 1151	АИНп	Св.АМг63		305...343 / 327	35...37 / 36	4,2...13,6 / 8,9	ЛС (1151) — 40 %; ОМ (ВАЛ16) — 60 %
ВАЛ16 + 1151		Св.1177		229...286 / 266	24...35 / 31	5,9...6,7 / 6,3	ОМ (ВАЛ16) — 100 %
ВАЛ16 + 1151	СТП	—		298...320 / 307	145...158 / 150	12,6...14,4 / 13,2	ОМ (ВАЛ16) — 100 %

Примечания: 1. СТП — сварка трением с перемешиванием; АИНп — автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. 2. ЛС — линия сплавления; ОМ — основной металл.

4. Восстановленные свойства сварных соединений алюминиевых сплавов в разноименном сочетании ВАЛ16 + 1151

Режим нагрева образца	Автоматическая аргонодуговая сварка				Сварка трением с перемешиванием		
	Марка проволоки	$\sigma_в$, МПа	α, °	*KC*U, кДж/м^2	$\sigma_в$, МПа	α, °	*KC*U, кДж/м^2
110 °С, 10 ч	Св.АМг63	221...328 / 276	30...42 / 36	12,4...18,4 / 14,6	288...305 / 297	140...150 / 145	12,2...14,0 / 12,8
	Св.1177	270...307 / 279	35...41 / 38	2,7...9,7 / 6,1			
250 °С, 3 ч	Св.АМг63	189...278 / 242	20...26 / 23	7,0...13,9 / 9,6	248...282 / 260	122...135 / 128	9,2...11,0 / 10,2
	Св.1177	194...280 / 238	19...31 / 26	1,8...6,9 / 5,0			
350 °С, 3 ч	Св.АМг63	196...217 / 204	28...35 / 31	24,2...26,7 / 25,4	211...222 / 215	152...175 / 165	11,8...13,4 / 12,5
	Св.1177	195...209 / 199	40...57 / 49	8,4...17,9 / 14,1			

механические свойства выше, чем с проволокой Св.1177. Разрушение образцов при растяжении происходит, в основном, по литейному сплаву ВАЛ16 или по линии сплавления сплава 1151.

Механические характеристики сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, существенно выше аналогичных характеристик соединений, полученных автоматической аргонодуговой сваркой.

В табл. 4 приведены восстановленные механические свойства сварных соединений после технологических и эксплуатационных нагревов при температурах 110 °С, 10 ч; 250 °С, 3 ч и 350 °С, 3 ч.

Из приведенных в табл. 4 данных видно, что у сварных соединений ВАЛ16 + 1151 с повышением температуры нагрева снижается прочность сварного соединения при повышении пластичности. Это наблюдается для сварки плавлением и сварки трением с перемешиванием.

Разрушение образцов в основном происходит по основному материалу ВАЛ16, только образцы с нагревом при температуре 350 °С, 3 ч разрушались при растяжении по сплаву 1151.

В табл. 5 представлены результаты механических испытаний сварных соединений с различным числом подварок по металлу шва.

Подварки до трех раз на 10...15 % снижают прочность сварного соединения, выполненного автоматической аргонодуговой сваркой, от исходного состояния.

При выполнении подварок автоматической аргонодуговой сваркой швов, выполненных сваркой трением с перемешиванием, отмечается образование на поверхности подварочного шва большого количества фрагментов оксидных пленок (рис. 1, *а*). Эти оксидные включения попали в металл шва при СТП, а затем при расплавлении металла шва дугой всплыли на поверхность сварочной ванны. Выполнение

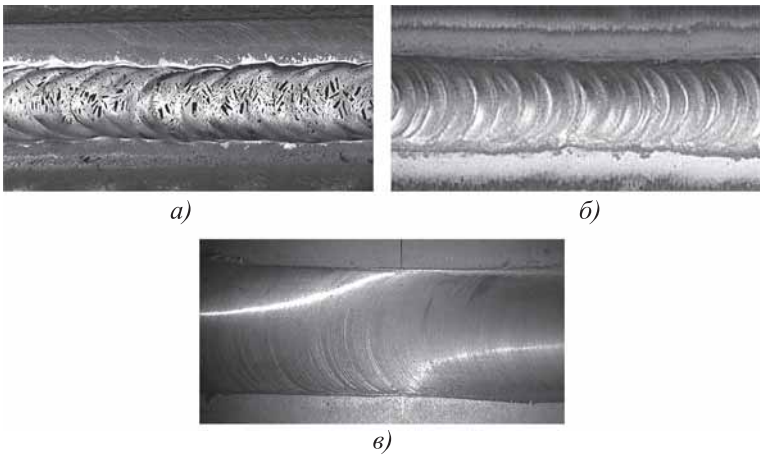
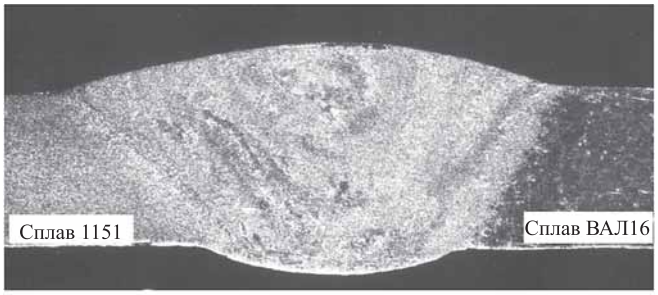


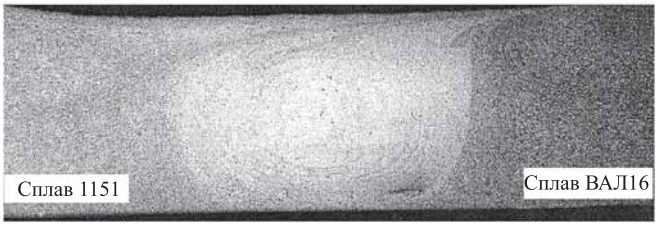
Рис. 1. Внешний вид шва, выполненного сваркой трением с перемешиванием (СТП) после подварки аргонодуговой сваркой (АИНп) (*а*), шва АИНп (*б*) и СТП (*в*) на исследуемых сплавах

5. Влияние подварок на механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов в разноименном сочетании ВАЛ16 + 1151

Способ сварки	Марка присадочной проволоки	Характеристика образца	$\sigma_в$, МПа	α, °	*KC*U, Дж/см^2	Характер разрушения образца при испытаниях
АИНп	Св.1177	Сварное соединение	229...286 / 266	24...35 / 31	5,9...6,7 / 6,3	ОМ (ВАЛ16) — 100 %
		1 подварка АИНп	211...268 / 252	25...30 / 27	5,2...6,1 / 5,5	ЛС (1151) — 20 % ЛС (ВАЛ16) — 80 %
		2 подварки АИНп	209...267 / 242	18...34 / 23	2,7...7,2 / 4,7	ЛС (1151) — 80 % ЛС (ВАЛ16) — 20 %
		3 подварки АИНп	200...237 / 224	30...39 / 34	7,2...8,1 / 7,6	ЛС (ВАЛ16) — 100 %
СТП	—	Сварное соединение	298...320 / 307	145...158 / 150	12,6...14,4 / 13,2	ОМ (ВАЛ16) — 100 %
		1 подварка СТП	290...315 / 303	150...162 / 155	12,8...14,8 / 13,6	
		2 подварки СТП	280...300 / 290	145...160 / 146	12,0...15,3 / 13,6	
		3 подварки СТП	270...295 / 280	165...180 / 175	11,8...14,6 / 12,6	
		1 подварка АИНп	268...300 / 277	105...118 / 112	8,6...10,4 / 9,2	ЛС (ВАЛ16) — 100 %
		2 подварки АИНп	239...257 / 248	68...84 / 73	4,7...6,2 / 5,5	По металлу шва
		3 подварки АИНп	179...197 / 184	28...44 / 33	3,7...5,2 / 4,5	



а)



б)

Рис. 2. Макроструктура соединения сплавов ВАЛ16 и 1151, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой (*а*) и сваркой трением с перемешиванием (*б*). (×4)

шва дугой по исходной поверхности исследуемых сплавов показало, что оксидных включений не образуется и поверхность шва чистая (рис. 1, *б*). Такая же чистая поверхность наблюдается и у шва, выполненного сваркой трением с перемешиванием (рис. 1, *в*).

Результаты испытаний на усталость сварных образцов, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием, приведены в табл. 6.

На рис. 2, *а* приведена макроструктура сварного соединения, выполненного автоматической аргонодуговой сваркой, сплавов ВАЛ16 и 1151 в разноименном сочетании. В центральной части шва — крупнозернистый участок. На периферии шва наблюдается крупнозернистая структура. В сварном шве видны изотермы кристаллизации.

Соединение, выполненное сваркой трением с перемешиванием, имеет типичную макро-

6. Результаты испытаний сварных образцов на усталость

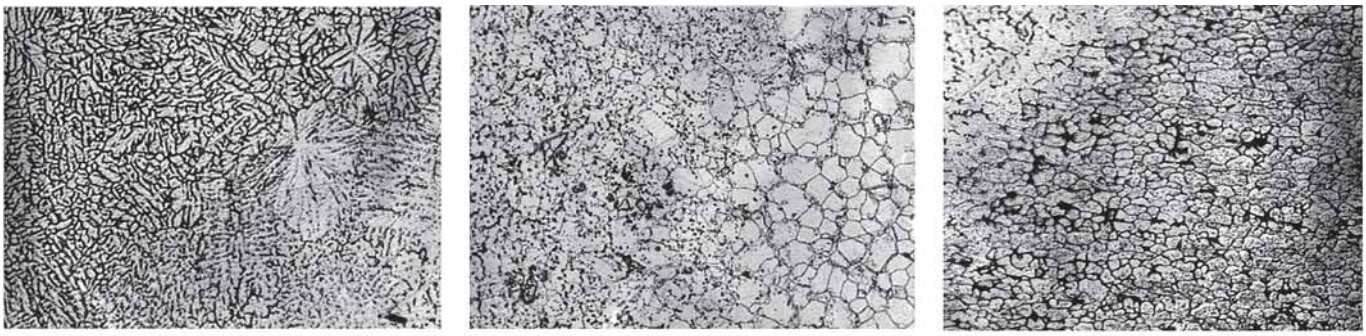
Способ сварки	Верхний предел нагружения, МПа	Число циклов до разрушения	Характер разрушения
АИНп	180	250 000...266 000	Основной металл (ВАЛ16)
	160	630 000...648 200	По линии сплавления (ВАЛ16)
	120	745 000...756 000	Основной металл (ВАЛ16)
	100	1 260 000...1 400 000	
	80	3 220 000...3 640 000	
	60	10^7	Без разрушения
СТП	180	366 000...382 000	Основной металл (ВАЛ16)
	160	705 000...718 000	
	120	793 000...811 300	
	100	1 460 000...1 620 000	
	80	10^7	Без разрушения
	60	10^7	

структуру для этого способа сварки, включающую в себя ядро шва, зону термомеханического воздействия, зону термического влияния и основной металл (рис. 2, *б*).

Микроструктура сварного шва (рис. 3, *а*) мелкодендритная. В зоне термического влияния со стороны сплава ВАЛ16 присутствуют нерастворенные включения алюминиево-магниевых фаз, характерных для этого сплава (рис. 3, *б*).

После нагревов при температурах 250 и 350 °С в течение 3 ч существенных изменений в структуре образцов не происходит. Нагрев 350 °С, 3 ч способствует росту зерна на основном металле сплава ВАЛ16.

Микроструктура шва соединения, выполненного с проволокой Св.1177, по сравнению с соединением, выполненным с присадочной проволокой Св.АМг63, более измельчена вследствие повышенного содержания модификаторов в присадочной проволоке Св.1177 по сравнению с Св.АМг63. В зоне термического влияния со стороны ВАЛ16 нерастворимых включений на периферии шва не обнаружено. В околошовной зоне со стороны сплава 1151 наблюдается зона рекристаллизованного зерна. В процессе сварки в этой зоне произошло растворение интерметаллидов в твердом растворе, так как их содержание там меньше по сравнению с основным металлом.



а) *б)* *в)*

Рис. 3. Микроструктура сварного соединения сплавов ВАЛ16 и 1151, выполненного автоматической аргонодуговой сваркой (×200):

а — шов; *б* — зона сплавления со стороны сплава ВАЛ16; *в* — зона сплавления со стороны сплава 1151

Микроструктура сварного соединения, выполненного сваркой трением с перемешиванием, в зоне перемешивания со стороны сплава 1151 мелкодисперсная и равноосная (рис. 4, *а*). Структура слоистой зоны состоит из чередующихся слоев белого цвета сплава ВАЛ16 и темных слоев сплава 1151 с рекристаллизованной мелкозернистой структурой.

Блестящая зона перемешивания, расположенная между слоистой зоной со стороны сплава ВАЛ16 и зоной перемешивания со стороны сплава 1151, не поддается травлению одновременно с другими участками соединения. Это косвенно указывает на изменение ее химического состава и наличия высоких внутренних напряжений (рис. 4, *б*).

После нагревов при температурах 250 и 350 °С в течение 3 ч существенных изменений в структуре образцов не происходит.

Проведено комплексное исследование коррозионной стойкости сварных соединений литейного сплава ВАЛ16 в сочетании с деформируемым сплавом 1151. Определены следующие характеристики:

1. Склонность к расслаивающей коррозии (ГОСТ 9.904—82).

2. Склонность к межкристаллитной коррозии (ГОСТ 9.021—74).

3. Склонность к общей коррозии в соответствии с ГОСТ 9.913—90 (по потере механических свойств и скорости коррозии).

4. Склонность к коррозионному растрескиванию в соответствии с ГОСТ 9.019—74 (по времени до растрескивания) — при постоянной деформации.

Полученные результаты испытаний приведены в табл. 7.

Из полученных результатов следует, что на сплаве ВАЛ16 нагрев 250 °С, 3 ч оказывает наиболее сильное отрицательное влияние: повышается склонность к межкристаллитной коррозии до 0,245 мм.

При автоматической аргонодуговой сварке ВАЛ16 + 1151 (см. табл. 7) в исходном состоянии с проволокой Св.АМг63 склонности к коррозионному растрескиванию при напряжении 200 МПа нет; в то же время при сварке с проволокой Св.1177 образцы разрушаются за 33...70 сут.

Нагрев 250 °С, 3 ч приводит к большим потерям механических свойств и высокой склонности к расслаивающей коррозии сплава 1151 (8 балл). Нагрев 350 °С, 3 ч приводит к повышению коррозионной стойкости — скорость общей коррозии минимальна, склонности к коррозионному растрескиванию при напряжении 200 МПа нет.

Склонность к межкристаллитной коррозии наблюдается на всех исследованных режимах нагрева сварных соединений после сварки. Эксплуатационные нагревы 250 °С, 3 ч и 110 °С, 10 ч приводят к увеличению склонности к расслаивающей коррозии до 3—4-го балла и к межкристаллитной коррозии глубиной от 0,28 до 0,42 мм (рис. 5).

Соединения, выполненные СТП, обладают более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с соединениями, выполненными сваркой плавлением. Снижение теплового воздействия на металл при СТП способствует уменьшению уровня остаточных пластических деформаций, возникающих в околошовной зоне сварных соединений под воздействием напряжений, превышающих условный предел текучести материала.

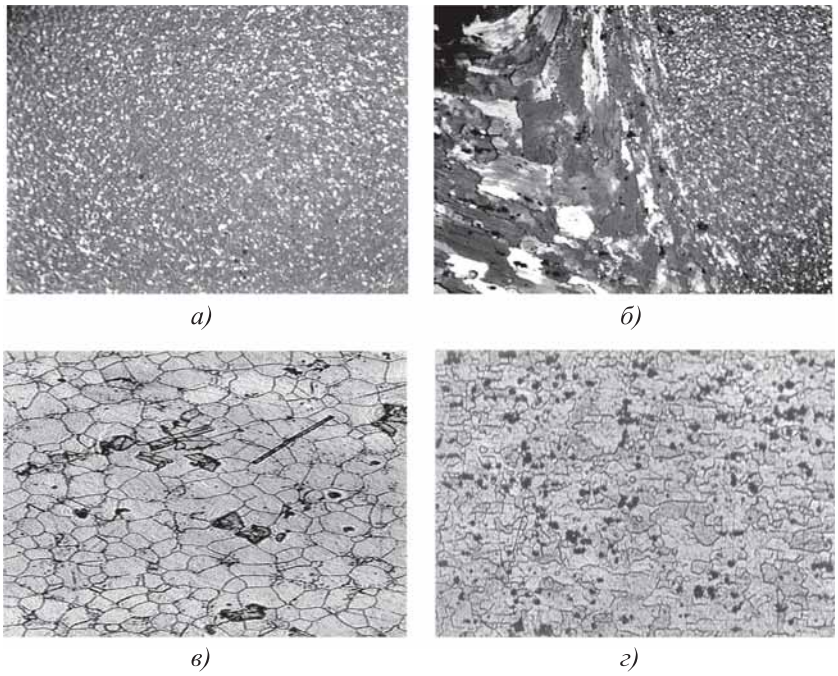


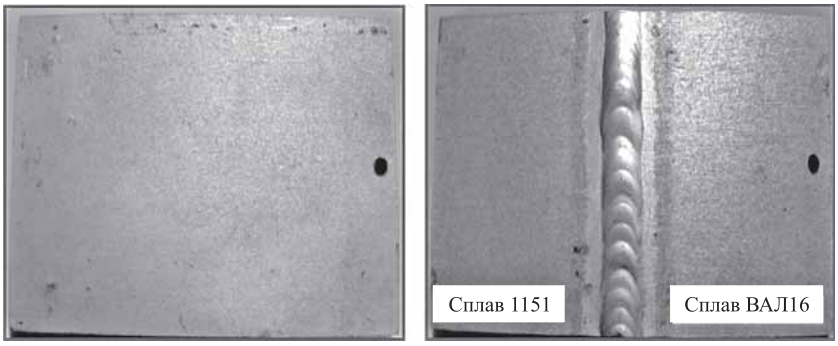
Рис. 4. Микроструктура сварного соединения сплавов ВАЛ16 и 1151, выполненного сваркой трением с перемешиванием (×200):

а — ядро шва; *б* — зона термодеформационного воздействия; *в* — основной металл (сплав ВАЛ16); *г* — основной металл (сплав 1151)

7. Результаты коррозионных испытаний сварных соединений из сплава ВАЛ16 со сплавом 1151

Характеристика образца	Вид сварки	Марка проволоки	Склонность к расслаивающей коррозии, балл		Склонность к межкристаллитной коррозии, мм		Время до растрескивания, сут	Общая коррозия	
			Зона сплавления со стороны			Шов		Потери прочности, %	Скорость коррозии, г/(м^2·сут)
			ВАЛ16	1151	ВАЛ16				
ВАЛ16, основной металл	—	—	—	—	0,07	—	—	—	—
ВАЛ16, основной металл с нагревом 250 °С, 3 ч	—	—	—	—	0,245	—	—	—	—
ВАЛ16+1151	АИНп	Св.АМг63	2	3	0,216	0,31	>90	26,61	1,55
ВАЛ16+1151 с нагревом 110 °С, 10 ч			2	5	0,245	0,35	>90	34,98	1,75
ВАЛ16+1151 с нагревом 250 °С, 3 ч			2	8	0,281	0,70	70	54,25	2,33
ВАЛ16+1151 с нагревом 350 °С, 3 ч			2	4	0,229	0,33	>90	13,96	1,49
ВАЛ16+1151		Св.1177	2	2	0,142	0,49	40	4,65	1,57
ВАЛ16+1151 с нагревом 110 °С, 10 ч			4	2	0,195	0,58	11	22,16	1,77
ВАЛ16+1151 с нагревом 250 °С, 3 ч			5	3	0,349	0,92	4	80,94	2,92
ВАЛ16+1151 с нагревом 350 °С, 3 ч			2	2	0,207	0,61	>90	23,42	1,82
ВАЛ16+1151	СТП	—	2	2	0,075	0,17	>90	11,14	0,93
ВАЛ16+1151 с нагревом 110 °С, 10 ч			2	2	0,094	0,19	>90	14,22	1,19
ВАЛ16+1151 с нагревом 250 °С, 3 ч			3	3	0,166	0,38	>90	22,84	1,66
ВАЛ16+1151 с нагревом 350 °С, 3 ч			2	2	0,112	0,21	>90	16,45	1,27

Наличие остаточных пластических деформаций укорочения на стадии охлаждения шва приводит к возникновению остаточных растягивающих напряжений в средней части сварного соединения. Поэтому применение СТП обеспечивает меньший уровень остаточных напряжений. Максимальное значение остаточных растягивающих напряжений в сварных соединениях сплава 1151, полученных автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом,



а) *б)*

Рис. 5. Образцы после испытаний на склонность к расслаивающей коррозии: *а* — основной материал сплав 1151; *б* — сварное соединение ВАЛ16 + 1151

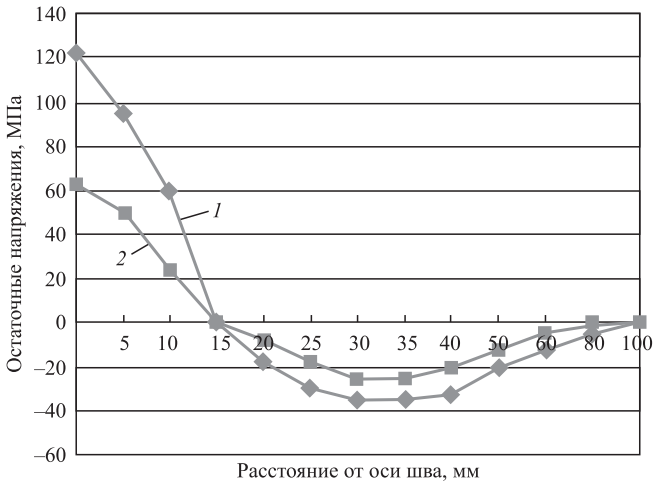


Рис. 6. Остаточные напряжения в сварных соединениях сплава 1151, полученных автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с присадкой СвАМг63 (*1*) и сваркой трением с перемешиванием (*2*)

составляет 122 МПа, а сваркой трением с перемешиванием — 62 МПа (рис. 6), т.е. такие соединения меньше склонны к распространению в них эксплуатационных трещин и имеют повышенную коррозионную стойкость.

Выводы

1. Сварка разноименного сочетания литейного сплава ВАЛ16 с деформируемым сплавом 1151 с применением присадочной проволоки Св.АМг63 показала удовлетворительные результаты. Механические свойства сварных соединений, выполненных с присадочной проволокой Св.1177 ниже, чем соединений с присадочной проволокой Св.АМг63, особенно пластические свойства.

2. Прочность сварных соединений, полученных автоматической аргонодуговой сваркой, для сочетания ВАЛ16 + 1151 составляет 100 % от прочности сплава ВАЛ16 (разрушение происходит по основному металлу сплава ВАЛ16). Пластичность (угол изгиба и ударная вязкость) сварных соединений достаточно высока.

3. Восстановленная прочность сварных соединений сплавов ВАЛ16 + 1151 с нагревами уменьшается с повышением температуры нагрева. Нагрев при температуре 250 °С в наибольшей степени ухудшает пластичность сварных соединений, выполненных как сваркой плавлением, так и сваркой трением с перемешиванием.

4. Подварки до трех раз на 10...15 % снижают прочность сварного соединения, выполненного автоматической аргонодуговой сваркой, от исходного состояния. Подварки соединения, выполненного сваркой трением с перемешиванием, практически не оказывают влияния на механические свойства соединений.

5. При выполнении подварок автоматической аргонодуговой сваркой швов, выполненных сваркой трением с перемешиванием, отмечены образование на поверхности подварочного шва большого количества фрагментов оксидных пленок и резкое снижение уровня механических свойств до уровня соединений, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой.

6. Значения усталостной прочности соединений, выполненных СТП, превосходят аналогичные показатели соединений, полученных сваркой плавлением (автоматическая аргонодуговая сварка) и приближаются к показателям основного металла (сплав ВАЛ16).

7. Сварные соединения ВАЛ16 + 1151 в исходном состоянии, выполненные сваркой плавлением, склонны к коррозионному растрескиванию и межкристаллитной коррозии, а после нагрева по режиму 350 °С, 3 ч приобретают удовлетворительную коррозионную стойкость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сварка** алюминиевых литейных сплавов / В.И. Рязанцев, В.В. Овчинников, Е.Б. Глотов, В.М. Кайнов // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 8. С. 17—25.

2. **Рязанцев В.И., Федосеев В.А.** Сварка разноименных алюминиевых и магниевых сплавов / Авиационная промышленность. 2000. № 3. С. 54—59.

3. **Овчинников В.В.** Современные наукоемкие технологии в сварочном производстве // Наукоемкие технологии. 2011. № 5. С. 35—45.

4. **Манаков И.Н., Овчинников В.В.** Исследование свариваемости литейного сплава ВАЛ8 с деформируемыми сплавами АМг6 и В-1341 // Научная перспектива. 2011. № 1. С. 62—63.

5. **Овчинников В.В., Манаков И.Н., Курбатова И.А.** Свариваемость литейного сплава ВАЛ14 с деформируемыми сплавами 1151 и М40 // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 11. С. 7—12.

6. **Овчинников В.В., Дриц А.М., Малов Д.В.** Механические свойства сварных соединений сплавов 1565чМ и 1460Т1 в разноименном сочетании, полученных сваркой трением с перемешиванием // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 6. С. 11—17.

Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук,
vikov1956@mail.ru;
Ольга Алексеевна Парфеновская, канд. техн. наук;
Иван Николаевич Манаков;
Марина Алексеевна Гуреева, канд. техн. наук

УДК 621.983; 539.374

С.Н. Ларин, Е.В. Леонова
(Тульский государственный университет)

Анализ формирования геометрических параметров ячеистых изделий, полученных изотермическим свободным деформированием в матрицу квадратной формы, из материалов, подчиняющихся кинетической теории пластичности и повреждаемости*

Приведены выражения для анализа процессов изотермического деформирования листовой заготовки квадратной формы, закрепленной по контуру. Установлено влияние закона нагружения, геометрических размеров заготовки, анизотропии механических свойств исходного материала на напряженное и деформированное состояния, силовые режимы и предельные возможности процесса изотермической пневмоформовки в режиме кратковременной ползучести, связанные с накоплением микроповреждений. Расчеты выполнены для алюминиевого сплава ВТ6С, поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости. Установлено влияние времени процесса на относительные величины толщины заготовки в куполе и месте ее закрепления, на высоту заготовки и максимальную накопленную повреждаемость.

Ключевые слова: матрица; свободное деформирование; ячейка; напряжения; деформации; силы.

The expressions for analysis of isothermal deformation processes of the square shape slab fixed on contour are presented. The effect of the loading law, the geometric dimensions of the workpiece, the anisotropy of the mechanical properties of the original material on the stress and strain states, the power modes and limits of isothermal pneumomolding process in the mode of short-term creep associated with the accumulation of micro-damages is founded. The calculations for aluminum alloy VT6S, whose behavior is described by the kinetic theory of plasticity and damageability are performed. The influence of process time on the relative values of the thickness of the workpiece in the dome and place of its fastening on the workpiece height and the maximum accumulated damage is founded.

Keywords: matrix; free deformation; cell voltage; strains; forces.

Ячеистые конструкции применяют для корпусов емкостей жидких компонентов топлива, а также для крыльев, обтекателей и т.д. При высокой несущей способности эти конструкции имеют относительно малую массу и равнопрочность при нагружении. Существующие технологические процессы изготовления ячеистых конструкций включают в себя операции механической обработки (фрезерование) и электроэррозии [1]. Однако наиболее перспективными являются технологии горячего медленного формоизменения избыточным давлением газа.

Рассмотрим деформирование листовой заготовки толщиной h_0 в квадратной матрице со сторонами $2a$ в режиме ползучести под действием гидростатического давления p, изменяющегося от времени деформирования t следующим образом: $p = p_0 + a_p t^{n_p}$, где a_p и

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания № 2014/227 на выполнение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014—2020 годы и грантов РФФИ № 16-48-710016 и 16-08-00020.

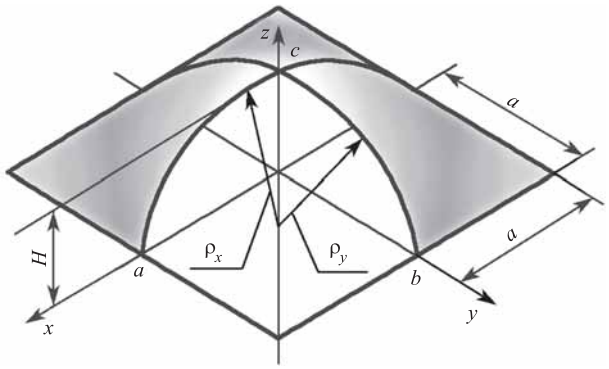


Рис. 1. Схема деформирования квадратной листовой заготовки

n_p — параметры закона нагружения. Материал заготовки принят анизотропным. Заготовка вырезана таким образом, что одна из сторон ее совпадает с направлением оси y (перпендикулярно направлению прокатки x) [1—6]. Заготовка закреплена по внешнему контуру (рис. 1).

Допустим, что напряженное состояние заготовки плоское ($\sigma_z = 0$) и поверхность заготовки при деформировании является частью сферы, причем профиль заготовки вдоль осей симметрии — окружность.

Радиусы кривизны ρ_x и ρ_y окружности равны [5]:

$$\rho_x = \rho_y = \frac{H^2 + a^2}{2H}. \quad (1)$$

Предположим, что траектории точек ортогональны в данный момент образующемуся профилю.

Скорости деформаций в этом случае в полюсе срединной поверхности определяют по формулам:

$$\xi^c_{xc} = \xi^c_{yc} = \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2}; \ \xi^c_{zc} = \frac{\dot{h}}{h}, \quad (2)$$

где $\dot{H} = dH/dt$; $\dot{h} = dh/dt$.

Учитывая, что листовая заготовка закреплена по внешнему контуру, в точках $x = a$, $y = 0$ и $x = 0$, $y = b$ имеем

$$\xi^c_{ya} = 0; \ \sigma_{ya} = \frac{H\sigma_{xa}}{F + H} = \frac{R_y\sigma_{xa}}{1 + R_y}; \ \xi^c_{xa} = -\xi^c_{za} \quad (3)$$

и $$\xi^c_{xb} = 0; \ \sigma_{xb} = \frac{H\sigma_{yb}}{H + G} = \frac{R_x\sigma_{yb}}{1 + R_x}; \ \xi^c_{yb} = -\xi^c_{zb}, \quad (4)$$

где H, G, F и R_x, R_y — параметры и коэффициенты анизотропии в направлении прокатки и перпендикулярном направлении листовой заготовки соответственно.

Примем для простоты анализа, что в каждый момент деформирования в сечении оболочки xoz скорость деформации ξ^c_y от купола к стороне $x = a$ вдоль оси x изменяется по линейному закону от максимального значения в вершине купола до нуля в точке $x = a$, а скорость деформации ξ^c_x постоянна по величине. Допускаем, что в сечении yoz скорость деформации ξ^c_x убывает по линейному закону от максимального значения в вершине купола оболочки до нуля в точке $y = b$, а величина ξ^c_y остается постоянной.

В этом случае в плоскости сечения xoz в точке $x = a$ имеем

$$\xi^c_{xa} = \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2}. \quad (5)$$

Так как в окрестности точки $x = a$ реализуется плоское деформированное состояние, то

$$\xi^c_{xa} = -\xi^c_{za}; \quad (6)$$

$$\frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2} = -\frac{\dot{h}_a}{h_a}. \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (7) при начальных условиях $t = 0$, $H_0 = 0$, $h_a = h_0$, получаем выражение для определения толщины в рассматриваемой точке:

$$h_a = h_0 \frac{a^2}{H^2 + a^2}, \quad (8)$$

где h_0 — начальная толщина листовой заготовки.

Аналогичным образом можно получить выражение для определения толщины в плоскости yoz в точке $y = a$:

$$h_b = h_0 \frac{a^2}{H^2 + a^2}, \quad (9)$$

т.е.

$$h_a = h_b = h_0 \frac{a^2}{H^2 + a^2}. \quad (10)$$

Изменение толщины в полюсе оболочки (точка *c*) находится из условия несжимаемости материала:

$$\xi_{zc}^{c} = -\xi_{xc}^{c} - \xi_{yc}^{c};\ \frac{\dot{h}_c}{h_c} = -\frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2} - \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2}. \quad (11)$$

Интегрируя выражение

$$\ln\frac{h_c}{h_0} = 2\ln\frac{a^2}{H^2 + a^2}, \quad (12)$$

получаем следующее выражение для определения толщины купола в рассматриваемой точке:

$$h_c = h_0\left[\frac{a^2}{H^2 + a^2}\right]^2. \quad (13)$$

Приведем окончательные выражения для определения искомых напряжений σ_x и σ_y [5]:

$$\sigma_y = \frac{p\rho_y}{h}/(1 + \chi_1);\ \sigma_x = \chi_1\sigma_y, \quad (14)$$

где

$$\chi_1 = \frac{R_x(1 + R_y) + R_xR_y}{R_y(1 + R_x) + R_xR_y} = \frac{R_x + 2R_xR_y}{R_y + 2R_xR_y}. \quad (15)$$

Найдем величину накопления повреждаемости в полюсе оболочки:

$$\dot{\omega}_{ec}^{c} = \frac{k}{B}\,\xi_e^c;\ k = B/\varepsilon_{e\,\text{пр}}^{c}. \quad (16)$$

Рассмотрим нагружение листовой заготовки, когда в полюсе оболочки $\xi_{ec}^{c} = \xi_{ec1}^{c} = \text{const}$. В этом случае, проинтегрировав уравнение (16) при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ec}^{c} = 0$, получим

$$\omega_{ec}^{c} = \frac{k}{B}\xi_{ec1}^{c}t = \frac{k\varepsilon_{ec}^{c}}{B}. \quad (17)$$

Предельная степень деформации достигается при $\omega_{ec}^{c} = 1$, откуда следует, что

$$\varepsilon_{ec\,\text{пр}}^{c} = \frac{B}{k}. \quad (18)$$

Давление, необходимое для реализации условий деформирования, вычисляем по соотношению

$$p = \frac{2\sigma_{e0}\left(1 - \omega_{ec}^{c}\right)^{m/n} Hh_0a^2(1 + \chi_1)}{D_1\left(H^2 + a^2\right)^3}\left(\frac{\xi_{ec1}^{c}}{B}\right)^{1/n}. \quad (19)$$

Зависимость $\omega_{ec}^{c} = \omega_e^c(t)$ определяется соотношением (17), а функцию $H = H(t)$ можно определить из выражения

$$\varepsilon_{ec}^{c} = \int_0^t \xi_{ec}^{c}dt = \xi_{ec1}^{c}t, \quad (20)$$

а также следующим образом:

$$\varepsilon_{ec}^{c} = \int_0^t C_1\xi_{yc}^{c}dt = \int_0^H C_1\frac{2HdH}{H^2 + a^2}, \quad (21)$$

т.е.

$$t = \frac{C_1}{\xi_{ec1}^{c}}\ln\frac{a^2}{H^2 + a^2}. \quad (22)$$

Рассмотрим нагружение листовой заготовки при $p = \text{const}$.

Подставив в уравнение (16) выражения (18) и соотношение (2), получим с учетом (18)

$$\dot{\omega}_{ec}^{c} = \frac{k}{B}C_1\frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2} = \frac{2C_1H\dot{H}}{\left(H^2 + a^2\right)\varepsilon_{ec\,\text{пр}}^{c}}. \quad (23)$$

Проинтегрировав это уравнение при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ec}^{c} = 0$, имеем

$$\omega_{ec} = \frac{1}{\xi_{ec1}^{c}}\ln\frac{a^2}{H^2 + a^2}. \quad (24)$$

Предельную высоту купола H_* можно определить из уравнения (24) при $\omega_{ec}^{c} = 1$.

Рассмотрим напряженное и деформированное состояния в точке $x = a$, $y = 0$.

Повреждаемость определяем из уравнения

$$\dot{\omega}_{ea}^{c} = \frac{\xi_{ea}^{c}}{\varepsilon_{ea\,\text{пр}}}. \quad (25)$$

В случае нагружения листовой заготовки, когда $\xi_{ea}^{c} = \xi_{ea1}^{c} = \text{const}$,

$$\omega_{ea}^{c} = \frac{\xi_{ea1}^{c}t}{\varepsilon_{ea\,\text{пр}}}. \quad (26)$$

Предельная степень деформации достигается при $\omega_{ea}^{c} = 1$.

Для определения давления, необходимого для реализации условий деформирования, нужно в первое уравнение $\xi_e^c = B\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{e_0}}\right)^n\frac{1}{\left(1 - \omega_e^c\right)^m}$ подставить выражения σ_{ea} и $\xi_{ea}^{c} = \xi_{ea1}^{c}$.

Тогда

$$p(t) = \frac{2\sigma_{e0}\left(1-\omega_{ea}^{c}\right)^{m/n} h_0 a^2 H}{\left(H^2+a^2\right)^2}\left(\frac{\xi_{ea1}^{c}}{B}\right)^{1/n}. \quad (27)$$

Функциональную связь $H = H(t)$ находим из условия

$$\varepsilon_{ea}^{c} = \int \xi_{ea1}^{c} dt = \xi_{ea1}^{c} t = \int \bar{C}_{1a}\, \xi_{xa}^{c} dt. \quad (28)$$

Следовательно,

$$t = \frac{\bar{C}_{1a}}{\xi_{ea1}^{c}} \int_0^H \frac{2HdH}{H^2+a^2} = \frac{\bar{C}_{1a}}{\xi_{ea1}^{c}} \ln\frac{H^2+a^2}{a^2}. \quad (29)$$

Если нагружение осуществляется при $p = \text{const}$, то накопление повреждаемости описывается уравнением

$$\dot{\omega}_{ea} = \frac{\xi_{ea}^{c}}{\varepsilon_{ea\,\text{пр}}^{c}} = \frac{\bar{C}_{1a}\xi_{xa}^{c}}{\varepsilon_{ea\,\text{пр}}^{c}} = \frac{\bar{C}_{1a} 2H\dot{H}}{\varepsilon_{ea\,\text{пр}}^{c}\left(H^2+a^2\right)}. \quad (30)$$

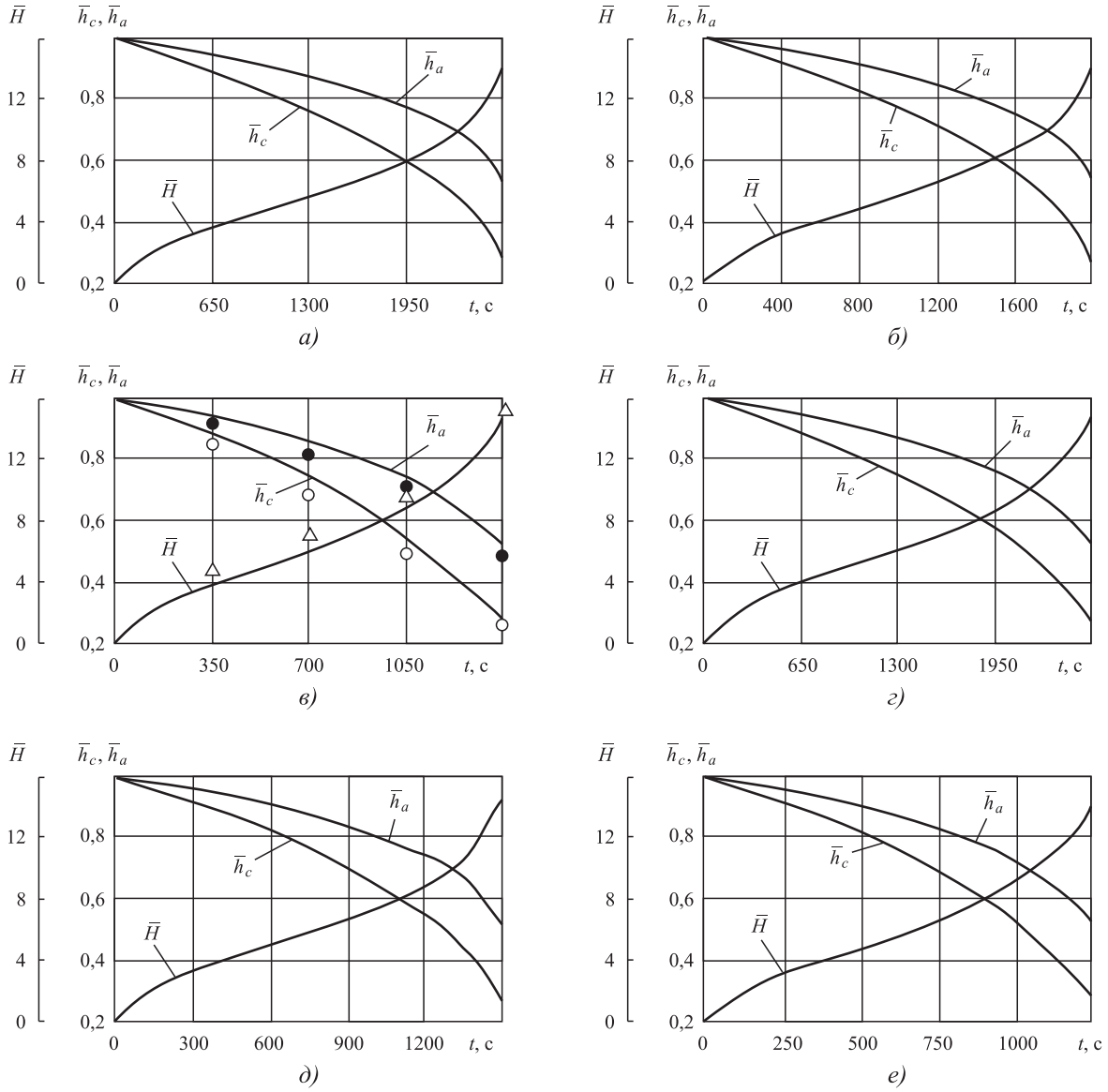


Рис. 2. Зависимости изменения относительных величин высоты заготовки $\bar{H}$, толщины заготовки в куполе $\bar{h}_c$ и в месте ее закрепления $\bar{h}_a$, в рассматриваемых точках от времени деформирования t для титанового сплава ВТ6С:

а — T = 930 °С; a_p = 0,04 МПа/c^{n_p}; n_p = 0,5; a = 15 мм; *б* — T = 930 °С; a_p = 0,05 МПа/c^{n_p}; n_p = 0,5; a = 15 мм; *в* — T = 930 °С; a_p = 0,08 МПа/c^{n_p}; n_p = 0,5; a = 15 мм; *г* — T = 930 °С; a_p = 0,06 МПа/c^{n_p}; a_p = 0,06 МПа/c^{n_p}; n_p = 0,45; a = 15 мм; *д* — T = 930 °С; a_p = 0,06 МПа/c^{n_p}; n_p = 0,525; a = 15 мм; *е* — T = 930 °С; a_p = 0,06 МПа/c^{n_p}; n_p = 0,55; a = 15 мм

Интегрирование этого уравнения при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ea}^{c} = 0$ приводит к соотношению

$$\omega_{ea}^{c} = \frac{\bar{C}_{1a}}{\varepsilon_{ea\,\text{пр}}^{c}} \ln \frac{H^2 + a^2}{a^2}. \qquad (31)$$

Величину H_* вычисляем из условия $\omega_{ea}^{c} = 1$.

Безразмерное время разрушения $\bar{t}_*$ определяется выражением

$$\bar{t}_* = \int_0^{H_*} \frac{(1-\omega_{ea}^{c})^m H^{n+1} a^{2n} h_0^n dH}{\left(H^2 + a^2\right)^{2n+1}}, \qquad (32)$$

где

$$\bar{t}_* = \frac{p^n \bar{D}_{1a}^n B}{\bar{C}_{1a} \sigma_{ea}^n 2^{n+1}} t_*. \qquad (33)$$

Условия деформирования в точке $x = 0$, $y = a$ аналогичны этим условиям в точке $y = 0$, $x = a$. Для изотропного тела этом случае необходимо принять $R_x = R_y = 1$.

Расчеты выполнены для титанового сплава ВТ6С при температуре $T = 930$ °С, поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости. Механические характеристики материала при формоизменении в условиях вязкого течения материала приведены в работах [1, 4].

Графические зависимости изменения относительных величин толщины заготовки в куполе $\bar{h}_c = h_c/h_0$ и в месте ее закрепления $\bar{h}_a = h_a/h_0$, высоты заготовки $\bar{H} = H/h_0$ ($h_0 = 1$ мм) и максимальной накопленной повреждаемости ω_A (в куполе заготовки) от времени деформирования t при различных законах нагружения (a_p и n_p) для титанового сплава ВТ6С ($T = 930$ °С), поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости, при заданном законе нагружения представлены на рис. 2. Точками обозначены результаты экспериментальных исследований.

Из анализа графических зависимостей следует, что с увеличением времени деформирования t до определенного предела резко возрастает относительная высота заготовки $\bar{H}$ и уменьшается относительная толщина заготовки в куполе $\bar{h}_c$ и в месте ее закрепления $\bar{h}_a$. Дальнейшее увеличение времени деформирования t приводит к плавному изменению исследуемых величин. В момент времени t, близкий к разрушению заготовки, происходит резкое изменение относительных величин $\bar{H}$, $\bar{h}_c$ и $\bar{h}_a$. Это связано с интенсивным ростом накопления микроповреждений в заключительной стадии процесса.

Установлено, что изменение относительной толщины в куполе заготовки $\bar{h}_c$ осуществляется более интенсивно по сравнению с изменением относительной толщины в месте ее закрепления $\bar{h}_a$. С ростом времени деформирования t эта разница увеличивается и может достигать 50 %.

Показано удовлетворительное согласование результатов теоретических и экспериментальных данных по изменению геометрических размеров квадратной листовой заготовки в процессе изотермической пневмоформовки (до 15 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Изотермическая** пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.Н. Ларин и др. / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
2. **Ларин С.Н.** Изотермическая свободная пневмоформовка элементов ячеистых панелей квадратного поперечного сечения из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. 2004. Вып. 3. С. 152—162.
3. **Ларин С.Н.** Пневмоформовка ячеистых панелей из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2010. Вып. 3. С. 51—61.
4. **Яковлев С.С., Ларин С.Н., Трегубов В.И.** Изотермическая пневмоформовка элементов ячеистых многослойных листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме ползучести / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 173 с.
5. **Малинин Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
6. **Оценка** предельных возможностей формоизменения при стесненном деформировании анизотропной листовой заготовки в квадратную матрицу / С.Н. Ларин и др. // Известия ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. 2006. Вып. 2. С. 177—183.

Сергей Николаевич Ларин, д-р техн. наук,
mpf-tula@rambler.ru;
Евгения Витальевна Леонова, канд. техн. наук

УДК 621.7.043

В.А. Демин, А.А. Рыжкова
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Влияние формы заготовки на коэффициент вытяжки цилиндрических деталей

Проведен анализ зависимости предельного коэффициента вытяжки от формы заготовки. Получена оценка изменения толщины детали при переходе от круглой к фигурной заготовке.

Ключевые слова: обработка металлов давлением; листовая штамповка; вытяжка; форма заготовки.

The dependence of the limiting drawing factor the shape of workpiece is analyzed. Estimate of the change in thickness of the part in the transition from round to shaped workpiece is performed.

Keywords: metal forming; sheet metal stamping; drawing; shape of workpiece.

При проектировании новых технологических процессов листовой штамповки необходимо выбирать современные конкурентоспособные технологии [1]. Однако большинство заводских технологов используют традиционные рекомендации, приводящие к проектированию неоптимальных технологических процессов с низким коэффициентом использования материала.

Внедрение в производство новых технологических наукоемких технологий [2] позволяет существенно улучшить параметры штамповки, получить существенную экономию по расходу материала на одно изделие и заданные характеристики штампуемой детали.

В настоящее время типовым технологическим процессом штамповки деталей типа "колпачок" является последовательность технологических операций, показанная на рис. 1 [3, 4].

Однако в работе [3] указано, что возможна штамповка из квадратной заготовки и это приводит к увеличению полезной высоты вытяжки на 18...20 %. Таким образом, применение квадратной заготовки позволяет получить экономию металла 12...13 % по сравнению с вытяжкой из круглой заготовки.

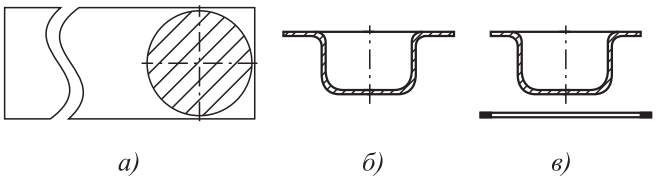


Рис. 1. Последовательность штамповки цилиндрического колпачка:
а — вырубка круглой заготовки; *б* — вытяжка; *в* — обрезка

В патенте [5] предложено для экономии металла, повышения производительности и качества получения сепараторов конических подшипников использовать фигурную заготовку, учитывающую плоскостную анизотропию листа. Заготовку необходимо вырезать в виде квадрата со срезанными углами, две боковые стороны которого параллельны направлению текстуры деформации полосы или ленты, полученной при прокатке, при этом углы срезают по дуге окружности с центром в точке пересечения боковых сторон квадрата.

В работе [6] рассмотрен процесс вытяжки квадратной заготовки в круговую матрицу. В ходе моделирования было установлено, что заготовки с большей относительной толщиной можно использовать только для вытяжки с меньшими коэффициентами. Так, при относительной толщине заготовки 3 предельно допустимый коэффициент вытяжки составляет 0,7. Процесс вытяжки протекает стабильно только при относительной толщине заготовок $\geqslant 0{,}4$, при которой максимальным является коэффициент вытяжки 0,54. Следовательно, интервал варьирования предельно допустимых коэффициентов вытяжки составляет 0,54...0,75

при относительной толщине заготовки от 0,4 до 3.

Однако в работах, посвященных штамповке цилиндрических деталей из квадратной заготовки, нет информации, когда можно применять квадратную заготовку.

В данной работе предложено оценить возможность получения качественной детали из квадратной, шестиугольной или восьмиугольной заготовок.

Основным параметром для расчета технологического процесса вытяжки цилиндрической детали является предельный коэффициент вытяжки [3]. Поэтому рассмотрим влияние формы заготовки на предельный коэффициент вытяжки.

Предельный коэффициент вытяжки для фигурной заготовки. Для теоретического анализа поставленной задачи использовали программу AutoForm^plus R5.1.

Материал заготовок — стали DC03, DC04 и DC05, которые являются аналогом стали 08.

Построена математическая модель вытяжки цилиндрического стаканчика диаметром d = 39 мм. Отношение радиуса пуансона $R_п$ и радиуса матрицы $R_м$ к толщине металла принято R/s = 2,5. Толщина штампуемого металла s = 1 мм. Коэффициент вытяжки изменяли, варьируя диаметр заготовки D. Шаг изменения диаметра заготовки при моделировании 1 мм.

Приняли, что заготовка может разрушиться, если более 5 % точек попали в зону "опасности возникновения разрывов". Если это условие возникало при D_i, то предельный коэффициент вытяжки рассчитывали по формуле

$$M_{пр} = d/D_{i-1}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что для восьмиугольной заготовки предельный коэффициент вытяжки в среднем изменяется на 2 % и не зависит от марки стали. Для шестиугольной заготовки коэффициент изменяется в среднем на 3 %, но зависит от марки стали. Для сталей DC03 и DC04 различие составляет 2 %, а для стали DC05 — 4 %. Для квадратной заготовки изменения коэффициента вытяжки имеют такой же характер, как и для шестиугольной заготовки. Для сталей DC03 и DC04 различие составляет 6 %, а для стали DC05 — 8 %.

1. Результаты расчета предельных коэффициентов вытяжки

Заготовка	Материал		
	DC03	DC04	DC05
Круглая	0,5	0,51	0,49
Восьмиугольная	0,51	0,52	0,5
Шестиугольная	0,51	0,52	0,51
Квадратная	0,53	0,54	0,53

Представляет интерес, как меняется коэффициент вытяжки при переходе от круглой заготовки к квадратной.

Найдем коэффициент перехода с фигурной заготовки на круглую:

$$k = \frac{m_{кр}}{m_{фиг}},$$

где $m_{кр}$, $m_{фиг}$ — предельные коэффициенты вытяжки для круглой и фигурной заготовки соответственно.

Результаты расчета представлены в табл. 2.

2. Коэффициенты перехода с фигурной заготовки на круглую

Заготовка	Материал		
	DC03	DC04	DC05
Восьмиугольная	0,980	0,981	0,980
Шестиугольная	0,980	0,981	0,961
Квадратная	0,943	0,944	0,925

Из табл. 2 видно, что при проектировании технологических процессов штамповки цилиндрических деталей с использованием восьмиугольной заготовки можно использовать предельные коэффициенты вытяжки для круглых заготовок, например из работы [3], так как величина k стремится к 1.

При проектировании технологических процессов штамповки из сталей DC03, DC04 и DC05 из квадратной заготовки необходимо

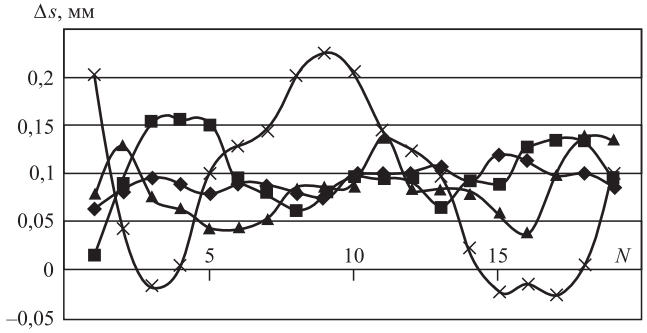


Рис. 2. Изменение толщины заготовки в характерном сечении:

◆ — круглая заготовка; ■ — восьмиугольная; ▲ — шестиугольная; × — квадратная

предельный коэффициент вытяжки для круглой заготовки разделить на 0,94.

Разнотолщинность при штамповке из фигурной заготовки. При использовании фигурных заготовок (особенно квадратных) логично ожидать существенного изменения толщины заготовки по периметру. Поэтому рассмотрим влияние формы заготовки на разнотолщинность получаемой цилиндрической детали.

Изменение толщины изучали в опасном и характерном сечениях, где опасное сечение — сечение с максимальной деформацией, в котором происходит разрушение заготовки, а характерное сечение — сечение с максимальной разнотолщинностью.

Установлено, что разнотолщинность в опасном сечении минимальна и определяется анизотропией заготовки. Разнотолщинность в характерном сечении показана на рис. 2 (где N — номер точки, отложенной по периметру через 9°).

Для круглой заготовки разнотолщинность составляет ±0,03 мм. Для квадратной заготовки разнотолщинность может достигать ±0,125 мм, что соответствует допуску на размер IT14. Таким образом, если на толщину задан допуск IT13 и выше, то штамповать из квадратной заготовки нельзя.

Для проверки полученных результатов было проведено экспериментальное исследование влияния формы заготовки на процесс штамповки.

В экспериментальном исследовании использовали сталь 08кп со следующими характеристиками: предел текучести $\sigma_т$ = 205 Н/мм^2; временное сопротивление $\sigma_в$ = 340 Н/мм^2; относительное удлинение δ = 31 %; толщина s = 1 мм.

Полученные механические характеристики стали 08кп были внесены в программу AutoForm^plus R5.1 и из этой стали были изготовлены заготовки круглой и квадратной форм.

Предельные коэффициенты вытяжки, полученные теоретически:

круглая заготовка — 0,51 (разрыв при 0,50);

квадратная заготовка — 0,54 (разрыв при 0,53).

Предельные коэффициенты вытяжки, полученные экспериментально:

круглая заготовка — 0,51 (разрыв при 0,50);

квадратная заготовка — 0,54 (разрыв при 0,53).

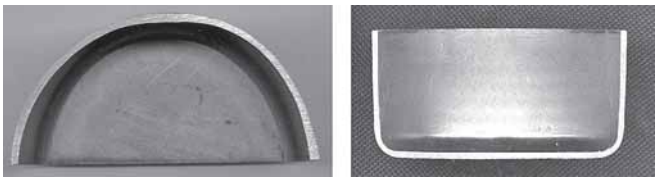
Предельный коэффициент вытяжки изменяется на 6 %, коэффициент перехода с фигурной заготовки на круглую равен 0,94, а коэффициенты, полученные теоретически и экспериментально, совпадают. Полученные результаты полностью соответствуют сталям DC03 и DC04.

Экспериментальная проверка. Проведено экспериментальное исследование разнотолщинности на стали 08кп.

Для этого детали, полученные из металла толщиной 1 и 2 мм, были разрезаны вдоль характерного сечения (где наблюдается максимальная разнотолщинность) и перпендикулярно основанию для определения максимального утонения (рис. 3).

Для измерения толщины использовали метод сканирования деталей с последующей обработкой полученных изображений и измерением в программе AutoCAD 2016 (рис. 4).

Для проверки предложенной методики измерения линейных величин была проведена



а) *б)*

Рис. 3. Разрезанные детали для определения разнотолщинности:

а — по характерному сечению; *б* — перпендикулярно основанию

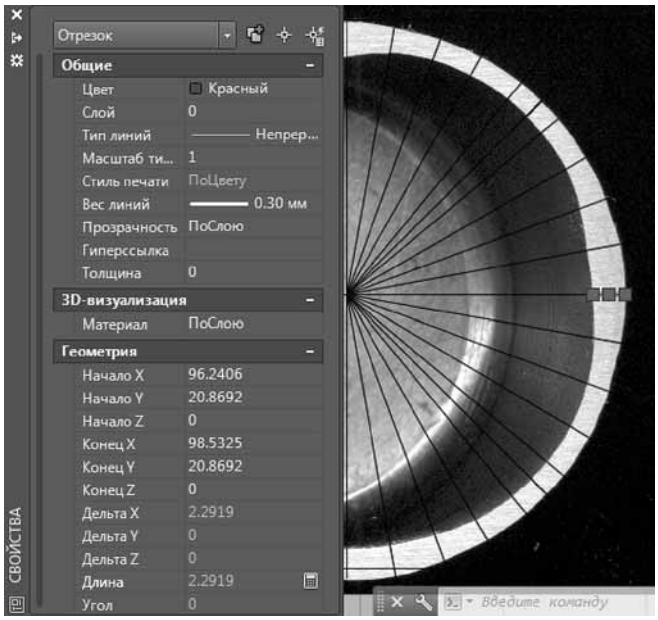


Рис. 4. Измерение детали в AutoCAD 2016

проверка полученных результатов на координатно-измерительной машине ARES 07.05.05 с точностью 3 мкм. Сравнение результатов показало, что расхождение полученных размеров не превышает 1 %.

Обработка полученных измерений позволила построить графики, иллюстрирующие изменение толщины в характерном сечении для заготовок толщиной 1 и 2 мм (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что полученная экспериментально разнотолщинность для стали 08кп существенно выше, чем для сталей типа DC. Так, для заготовки толщиной 1 мм в эксперименте получена разнотолщинность 0,5 мм, а теоретически 0,35 мм. Для заготовки толщиной 2 мм в эксперименте получена разнотолщинность 1,0 мм, а теоретически 0,9 мм.

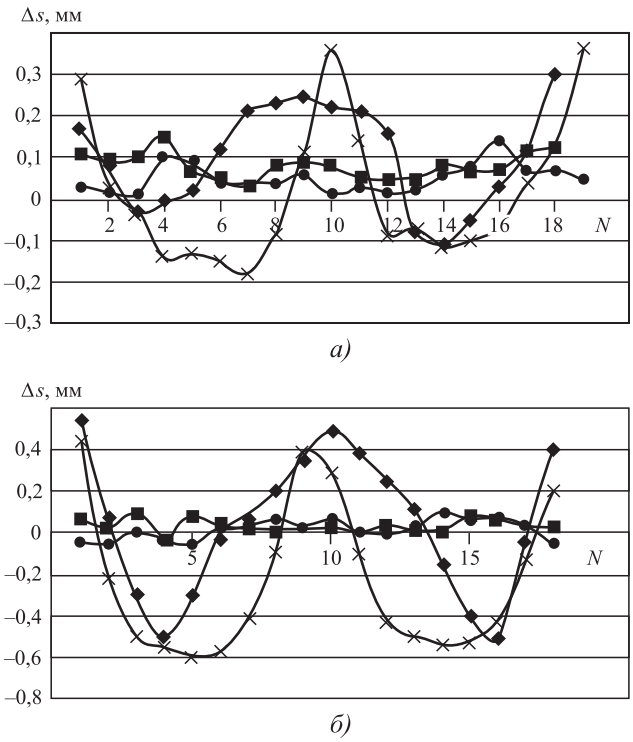


Рис. 5. Изменение толщины в характерном сечении для заготовки толщиной 1 (*а*) и 2 мм (*б*):

◆ — круглая заготовка; ■ — восьмиугольная; ▲ — шестиугольная; × — квадратная

Определено процентное отклонение от первоначальной толщины заготовки. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Установлено, что экспериментально полученная разнотолщинность на 10 % больше теоретической. Изменение толщины в характерном сечении может достигать 36 % от первоначальной толщины.

3. Отклонение от первоначальной толщины заготовки

Заготовка		Моделирование		Эксперимент	
Форма	Толщина, мм	Отклонение, %			
		max	min	max	min
Круглая	2	5	1	5	2,5
Квадратная		27	25	22	30
Круглая	1	15	8	10	0
Квадратная		25	11	36	18

Выводы

1. Переход на квадратную заготовку позволяет увеличить коэффициент использования материала на 15 %, исключить операцию вырубки заготовки и уменьшить заготовку на величину перемычек.

2. При проектировании технологических процессов вытяжки из фигурной заготовки можно использовать предельные коэффициенты вытяжки для круглых заготовок,

деля их на полученные коэффициенты перехода k. Штамповку из восьмиугольной заготовки можно проводить при предельных коэффициентах вытяжки, полученных для круглой заготовки.

3. Штамповка из квадратной заготовки приводит к существенному изменению толщины металла в станке штамповочного перехода. Разнотолщинность может достигать 36 % и выйти за допуск IT14, чаще всего применяемый для деталей, получаемых листовой штамповкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дмитриев А.М., Демин В.А.** Современные конкурентоспособные технологии, оборудование и оснастка при производстве заготовок давлением // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2011. № 5. С. 34—38.

2. **Демин В.А.** Наукоемкие технологии обработки давлением на современном этапе развития машиностроения // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2016. № 4 (58). С. 10—13.

3. **Романовский В.П.** Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

4. **Справочник** по листовой штамповке: учеб. пособие / В.А. Демин, К.Д. Львович, П.В. Маркин, Е.И. Семенов, А.Е. Феофанова; под ред. В.А. Демина и Е.И. Семенова. М.: МГИУ, 2010. 177 с.

5. **Пат. 2103096 РФ.** Способ получения сепараторов конических подшипников / С.А. Евсюков, А.Н. Алхименков; опубл. 27.01.1998.

6. **Кухарь В.Д., Екимова О.А.** Технологические параметры при вытяжке цилиндрических деталей без фланца из квадратных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 1. С. 82—86.

Виктор Алексеевич Демин, д-р техн. наук,
va_demin@bk.ru;
Александра Александровна Рыжкова

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,
тел.: (495) 785-6069,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 621.981.1:621.77

Л.А. Барков, М.Н. Самодурова, Ю.С. Латфулина
(Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)

Процессы получения полуфабрикатов и прутков из сплавов титана прессованием и прокаткой в многовалковых калибрах

Представлены результаты исследования процессов получения полуфабрикатов и прутков из сплавов титана. Установлены оптимальные условия, при которых достигается повышенная точность размеров шестигранных профилей.

Ключевые слова: прессование; прокатка; шестигранный профиль; титан; пруток; многовалковый калибр.

Results of the study of obtaining processes of semi-finished products and bars of titanium alloys are presented. Optimal conditions for improving the accuracy of the sizes of hexagonal profiles are established.

Keywords: pressing; rolling; hexagonal profile; titanium; bar; multi-roll pass.

Основным производителем титана в мире с 1957 по 1990 г. было российское Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение (ВСМПО)[1]. Так, еще в 1991 г. объем выплавленных на ВСМПО титановых слитков на 50 % превышал общий объем производства титановых слитков в США, Европе и Японии вместе взятых. При этом до 55 % произведенного титана в бывшем СССР шло на нужды авиации, до 25 % — на флот, 15 % — на космическую и ракетную технику, остальное — на базовые отрасли экономики. В настоящее время ОАО "ВСМПО-АВИСМА" остается крупнейшим в мире производителем титана[2].

Титан и его сплавы, в отличие от других металлов, прежде всего от стали, при горячей и холодной пластической деформации имеют высокое сопротивление деформации, пониженную пластичность, высокую чувствительность к поверхностным дефектам, интенсивно упрочняются и налипают на инструмент при обработке давлением.

Получение прутков из сплава титана прессованием. С момента начала получения изделий в виде полуфабрикатов из титана в 1957 г. процесс горячего прессования остается одним из основных промышленных способов их пластической деформации (см. кн.: Ерманок М.З., Соболев Ю.П., Гельман А.А. Прессование титановых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 264 с.). На рис. 1 показана схема горячего прессования изделий из заготовок сплавов титана по способу Сежурне, с которого началось получение титановых полуфабрикатов и прутков в США и бывшем СССР.

Механически обработанные заготовки сплавов титана перед прессованием покрывают смазкой путем обкатки их по размолотому стеклу.

Кроме указанных выше особенностей титановые сплавы при прессовании отличаются низкой скоростью выхода прессовок из матрицы

[1] http://www.vsmpo.ru/produkcija
[2] http://www.aviaport.ru/digest

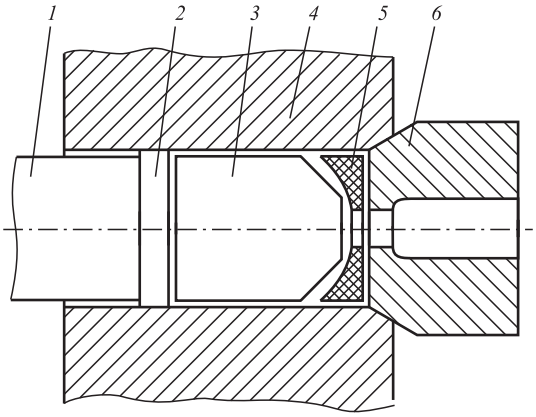


Рис. 1. Схема прессования прутков и профилей по способу Сежурне:

1 — пресс-штемпель; *2* — пресс-шайба; *3* — заготовка; *4* — контейнер пресса; *5* — смазочная стеклошайба; *6* — матрица

(0,4...0,6 м/с), высокой интенсивностью износа матрицы, стойкость которой не превышает 2—3 прессовок [1]. Затруднения вызывает также операция отделения пресс-остатков от прессовок, имеющих значительные припуски для последующей механической обработки.

Несмотря на разработку инновационных технологий на основе процесса прессования, выполненных в последние годы [1], качество поверхности прессованных прутков и допуски на их геометрические размеры часто не удовлетворяют потребителей. Поэтому для улучшения качества поверхности и точности размеров прессовок необходима их последующая калибровка, выполняемая волочением, обработкой на прессах с *пульсирующим приложением нагрузки* (ППН) и прокаткой на станах с многовалковыми калибрами.

К преимуществам процесса волочения обычно относят простоту используемого оборудования и технологической оснастки, а к недостаткам — неблагоприятные схемы напряженно-деформированного состояния при волочении, что влияет на качество поверхности прутков [1].

Калибровка на прессах ППН обеспечивает более высокое качество поверхности прутков [1] по сравнению с волочением. Однако калибровка на прессах ППН выполняется с очень малой скоростью (менее 2 м/мин) и ограниченными силовыми параметрами [1].

В этом отношении калибровка прокаткой имеет преимущества, поскольку скорость обработки технологически не ограничена и лимитируется не кинематическими или динамическими характеристиками станов, а производительностью нагревательных устройств при горячей калибровке.

При прокатке отсутствуют отходы металла на захватку, достигающие при волочении или калибровке ППН 3...4 %.

После создания прокатных клетей с многовалковыми калибрами [2] повышенной жесткости калибровка прокаткой получила дополнительные преимущества, заключающиеся в достижении более высоких обжатий, а также в повышении точности геометрии калиброванных профилей.

Получение прутков из сплавов титана прокаткой на станах с многовалковыми калибрами. Несмотря на интенсивное развитие процессов прессования прутков и профилей из сплавов титана, полученные изделия не полностью удовлетворяют потребителей по качеству, а процесс — по трудоемкости и производительности.

В связи с указанными недостатками процесса прессования сплавов титана с середины 50-х годов прошлого века в нашей стране уже проводились исследования процесса горячей прокатки титана [2]. При этом определялись геометрические, кинематические и силовые контактные условия в очаге деформации, устанавливались особенности уширения, опережения, характер скольжения и прилипания титана к валкам.

В настоящее время в РФ основным производителем проката в виде сортовых титановых полуфабрикатов и прутков является ОАО "ВИЛС" (г. Москва), получаемого на трех линиях сортового стана 250, состоящего из черновой линии 500, промежуточной линии 300 и чистовой линии 250 [3].

Установка в линию стана 250 (ОАО "ВИЛС") 10-клетьевого блока с трехвалковыми клетями исключает кантовку полосы, позволяет выполнить прокатку с всесторонним обжатием и минимальными допусками.

Схема калибровки валков на чистовой линии 250 с применением 10-клетьевого блока 230 с трехвалковыми калибрами приведена на рис. 2.

Значительное сужение поля допуска по диаметру с ±0,4 до ±0,1 мм позволит снизить припуск под дальнейшую механическую обработку на токарно-шлифовальной линии бес-

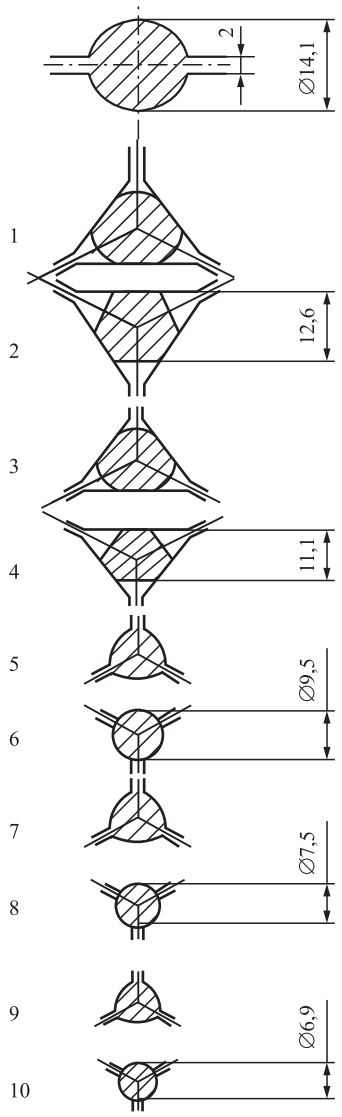


Рис. 2. Схема калибровки валков линии чистовой прокатки на 10-клетьевом блоке

центровой обточки "Хетран" с 1,0 до 0,6 мм, работающей по системе бухта—бухта, бухта—пруток, и обеспечить параметр шероховатости поверхности $Ra < 1{,}00$ мкм.

Технологический процесс на линии чистовой прокатки 250 осуществляется следующим образом. Подкат диаметром 14,1 мм из клети 6 линии 250 передается в 10-клетьевой блок 230 для прокатки катанки диаметром 6,9; 7,5 и 9,5 мм. Катанка сматывается в бунт на моталке. При прокатке прутков диаметром свыше 14,0 мм 10-клетьевой блок 230 не используется, а полоса передается к переносным летучим или стационарным ножницам для резки на мерные длины.

Прокатка титановых прутков на станах с многовалковыми калибрами конструкции Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ). Учеными ЮУрГУ на уровне изобретений[3] разработан целый ряд конструкций станов с многовалковыми калибрами, предназначенных для прокатки прутков из малопластичных металлов и сплавов на основе вольфрама, молибдена, титана, никеля и интерметаллидов [4].

Наиболее широкое промышленное применение на предприятиях России получили универсальные станы типа МКУ конструкции ЮУрГУ со сменными кассетами с трехвалковыми и четырехвалковыми калибрами [5, 6]. На рис. 3 показан общий вид клети стана МКУ-280 с четырехвалковой кассетой. В таблице приведена техническая характеристика клетей универсальных станов с многовалковыми калибрами типов МКУ-210, МКУ-230, МКУ-280 и МКУ-380. На конструкцию станов этого типа получены патенты США, Японии и европейских стран[4].

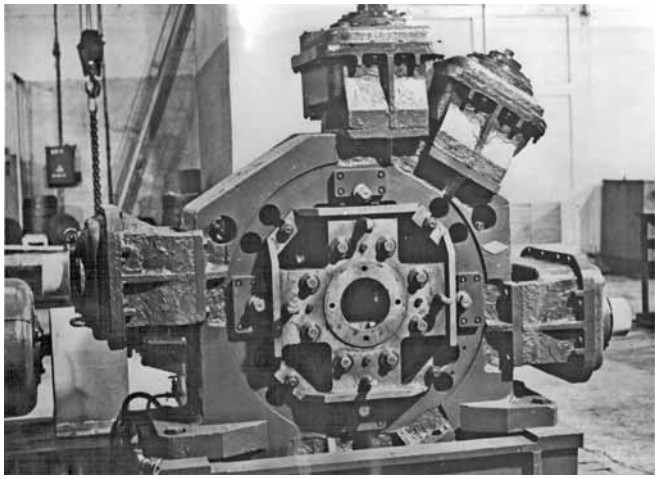


Рис. 3. Общий вид универсального стана МКУ-280 с четырехвалковой кассетой

Исследования по горячей, теплой и холодной прокатке титановых простых и фасонных профилей с многосторонним обжатием ученые ЮУрГУ проводят начиная с 1973 г. совместно с ВСМПО, ВИЛС, ВИАМ и предприятиями авиационной промышленности России [2, 7].

---

[3] А.с. СССР № 778831, № 875693, № 876217, № 1003946, № 1218567 и др.

[4] Пат. США № 4244204, Японии № 1091536, ФРГ № 2848440, Франции № 2409098, Австрии № 371379, Швейцарии № 636286.

Техническая характеристика станов с многовалковыми калибрами конструкции ЮУрГУ

Параметр	Тип стана			
	МКУ-210	МКУ-230	МКУ-280	МКУ-380
Габаритные размеры стана, мм:				
длина	2800	1750	2295	5140
ширина	1400	2610	3535	1700
высота	1800	1990	2470	1850
Номинальный диаметр валков, мм	210	230	280	380
Наибольший размер заготовки, мм	20	25	40	60
Наименьший размер проката, мм	5	8	8	12
Число валков: образующих калибр/приводных	4/4	4/4	4/4	4/2
Допустимая сила прокатки, кН	100	140	250	400
Допустимый момент прокатки, кН·м	8	10	12	20
Мощность привода, кВт	30	45	60	160

В отличие от сортовых станов с двухвалковыми калибрами обжатие на станах типа МКУ осуществляется не с двух, а с трех или четырех сторон. Это создает благоприятные силовые условия в очаге деформации, повышающие пластичность труднодеформируемых сплавов. Многосторонняя деформация обеспечивает высокие вытяжки за проход, что по сравнению с двухсторонней прокаткой позволяет в 2—5 раз сократить число проходов, устранить поперечную деформацию, увеличить точность проката и улучшить служебные свойства изделий.

Первоначально была исследована горячая прокатка титановых шестигранных прутков с трехсторонними и четырехсторонними обжатиями по схемам калибровок, представленных на рис. 4. Прокатка по схемам круг—трехгранник—трехгранник (см. рис. 4, *а*) и круг—трехгранник—шестигранник (рис. 4, *б*) оказалась трудноконтролируемой. В трехвалковых калибрах, образованных гладкими валками, трехгранный подкат в чистовом проходе требует надежного удерживания. При прокатке в трехвалковом шестигранном калибре трехгранного проката часто возникает опасность переполнения калибра металлом.

Прокатка по схемам круг—шестигранник—шестигранник (см. рис. 4, *в* и *г*) связана с неполным заполнением углов, образованных ручьями валков, в первом шестигранном калибре. При этом в калибрах, образованных тремя валками,

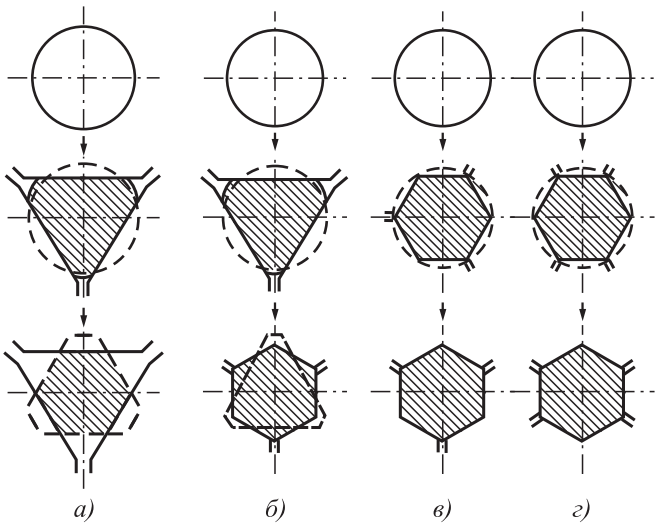


Рис. 4. Схема калибровки при горячей прокатке шестигранных профилей из сплавов титана

не заполняются три угла профиля, а в калибрах, образованных четырьмя валками, — два угла профиля. Прокатка во втором шестигранном калибре после кантовки на угол 60° не обеспечивает формирования правильного шестигранного профиля. Кроме того, существует опасность переполнения чистового калибра металлом и образования заусенцев на профиле.

При горячей прокатке шестигранников в качестве заготовок использовали круглый прокат диаметрами 16...21 мм после обточки для удаления газонасыщенного слоя. Горячую прокатку сплавов титана марок ВТ1-0, ОТ4,

ВТ5, ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ14 и ВТ16 выполняли при температурах 1050...1150 °С [4].

Для устранения недостатков первоначальных схем горячей прокатки шестигранных профилей учеными ЮУрГУ на уровне изобретений для станов типа МКУ-210 и МКУ-280 предприятий авиационной промышленности были предложены оригинальные системы трехвалковых и четырехвалковых калибров[5].

Первая система содержит шестигранный шестивалковый калибр и шестигранные четырехвалковые калибры, в которых калибры попеременно образованы горизонтальными гладкими валками и вертикальными калиброванными и наоборот.

Вторая система содержит шестигранный шестивалковый калибр и шестигранные четырехвалковые калибры с гранями, повернутыми относительно граней предыдущего калибра на 30°, дополнительно снабжена по крайней мере двумя трехвалковыми шестигранными калибрами, установленными после четырехвалковых калибров, причем грани каждого трехвалкового калибра повернуты относительно граней предыдущего калибра на 30°.

Для снижения толщины газонасыщенного слоя, образующегося на прутках после горячей прокатки, исследована теплая прокатка (при температурах 450...600 °С) специальных шестигранных профилей с размером под ключ $22^{-0,14}$ мм со скругленными углами. В качестве исходных заготовок для промышленной технологии на стане типа МК-330 с трехвалковыми калибрами конструкции ЮУрГУ использовали полуфабрикаты диаметром $24^{+0,2}_{-0,3}$ мм из титанового сплава ВТ3-1. Газонасыщенный слой после теплой прокатки профилей практически отсутствовал [7].

Для обеспечения повышенной точности шестигранных профилей применяли трехвалковый калибр специальной конструкции (А. с. СССР № 1380815). Принцип конструкции трехвалкового калибра, включающего в себя гладкие бочки трех валков и их конические бурты, показаны на рис. 5.

Исследования и разработка промышленных технологий холодной прокатки шестигранных профилей размерами 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20 и 22 мм из сплавов титана малой, средней и высокой прочности выполняли на опытно-промышленных станах ЮУрГУ с трехвалковыми калибрами (МК-330 и МК-330×2), многовалковыми калибрами (МКУ-210, МКУ-230, МКУ-280) и четырехвалковыми калибрами (МК-380) [4, 8, 9].

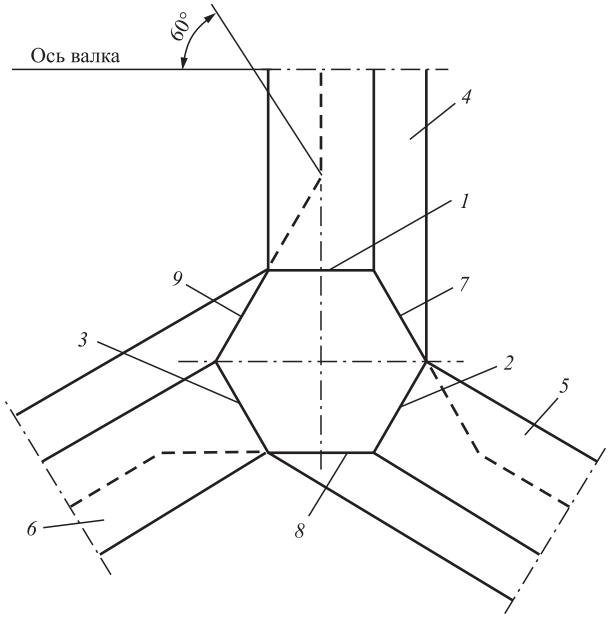


Рис. 5. Трехвалковый калибр специальной конструкции: *1—3* — цилиндрические участки; *4—6* — валки; *7—9* — конические бурты для стыковки валков

Исследования холодной прокатки специального шестигранного профиля размером $22^{-0,14}$ мм из титановых сплавов ВТ1-0, ВТ5-1, ВТ3-1 и ВТ8 осуществляли на опытно-промышленном стане с трехвалковыми калибрами типа МК-330. Разовые обжатия заготовок диаметром 24...25 мм на гладких валках диаметрами 310 мм из отбеленного чугуна составляли 2,5...3,5 % при суммарных обжатиях до 10 %.

Промышленную технологию холодной прокатки специального шестигранника $22^{-0,14}$ мм на двухклетевом стане МК-330×2 (ВСМПО) выполняли в двух трехвалковых калибрах из шлифованных заготовок диаметром $24^{+0,2}_{-0,3}$ мм (рис. 6). Из титанового сплава малой прочности и повышенной пластичности марки ВТ1-0 шестигранник получается за один проход в первом калибре и два прохода во втором калибре. Из сплавов средней прочности и пониженной пластичности марок ВТ5-1 и ВТ3-1 шестигранник $22^{-0,14}$ мм можно получить не за три, а за пять проходов. При дополнительном калибрующем проходе в трехвалковом (рис. 7, *а*) или шестивалковом (рис. 7, *б*)

[5] А.с.СССР № 1029500, № 1164962.

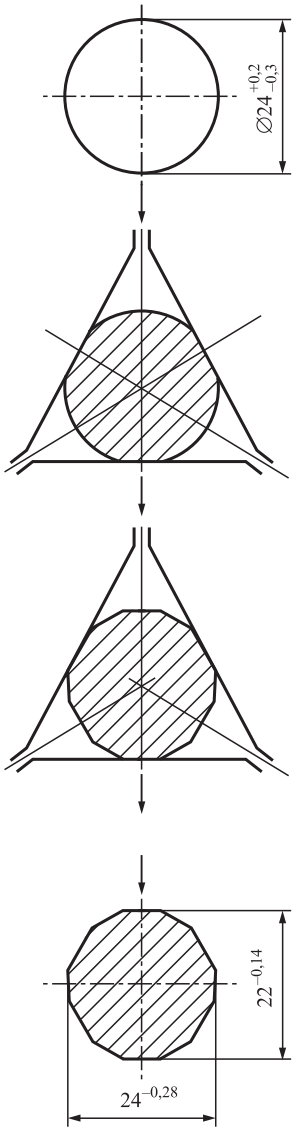


Рис. 6. Схема калибровки валков для холодной прокатки специального шестигранного профиля из титановых сплавов

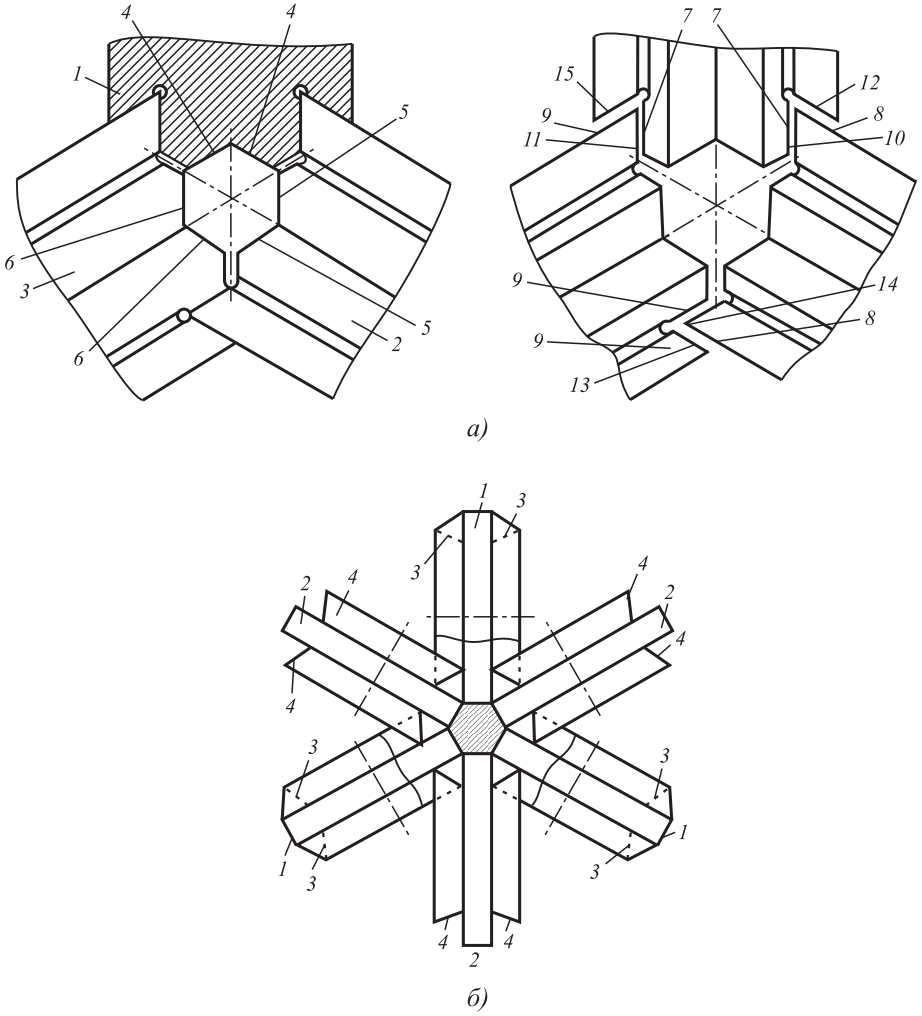


Рис. 7. Калибрующие трехвалковый (*а*) и шестивалковый (*б*) калибры:

а — *1—3* — валки; *4—6* — ручьи; *7—9* — контактные поверхности замковых участков; *10*, *11* и *12*, *13* — контактные поверхности замковых участков смежных валков *2*, *3* и *1*, *3* соответственно; *14*, *15* — контактная поверхность смежного валка *2* и *1* соответственно; *б* — *1* — нечетные валки; *2* — четные валки; *3* — внутренние бурты нечетных валков; *4* — наружные бурты четных валков

калибрах, конструкция которых выполнена на уровне изобретений[6].

Исследования холодной прокатки шестигранных профилей из сплавов титана ВТ1-0, ВТ5-1 и ВТ3-1 с размерами 6; 8; 10; 12 и 14 мм выполняли на опытно-промышленном стане МКУ-200. Промышленная технология холодной прокатки шестигранников размером $10^{-0,2}$ мм из сплава ВТ3-1 проиллюстрирована калибровкой на рис. 8. В качестве исходных заготовок использовали круглый шлифованный прокат диаметром 12 мм, а в качестве оборудования — стан МКУ-210. Повышенная точность размеров шестигранников после двух проходов прокатки достигается калибровкой в замковом калибре повышенной жесткости (рис. 9).

Промышленную технологию холодной прокатки шестигранных профилей размерами 16; 18; 20 и 22 мм из сплавов ВТ3-1 и ВТ16 выполняли на станах типа МКУ-280 из шлифованных круглых заготовок.

[6] А.с.СССР № 882671, № 806175, № 980878.

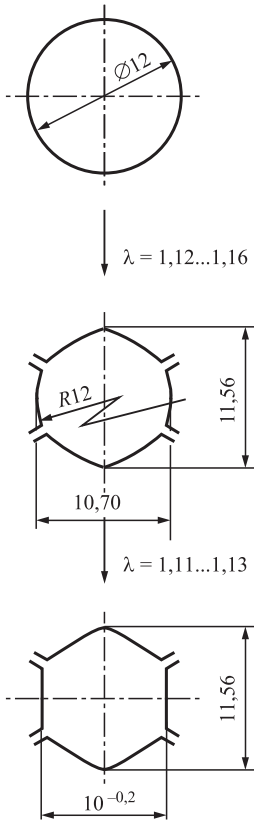


Рис. 8. Калибровка заготовки и калибров при прокатке шестигранника 10 мм в четырехвалковых калибрах (λ — коэффициент вытяжки)

Заключение. Исследования холодной прокатки профилей из сплавов титана показали следующие результаты. В процессе получения прутков прессованием эффективно использовать калибровку прокаткой, так как при этом достигаются более высокие обжатия и повышается точность геометрии профилей. Усовершенствованный технологический процесс прокатки прутков на станах с многовалковыми калибрами позволил снизить припуск под механическую обработку, что уменьшило трудоемкость процесса, а также удешевило конечное изготовление продукта.

Ряд станов, созданных учеными ЮУрГУ, оригинальной конструкции с многовалковыми калибрами широко применяют в производстве на предприятиях России. Такие станы позволяют повысить пластичность труднодеформируемых сплавов, производить профили повышенной точности, сократить число проходов, тем самым уменьшив трудозатраты в производстве. Также немаловажным результатом исследований было снижение газонасыщенного слоя на поверхности прутков после горячей прокатки, что дало увеличение качества поверхности прутков.

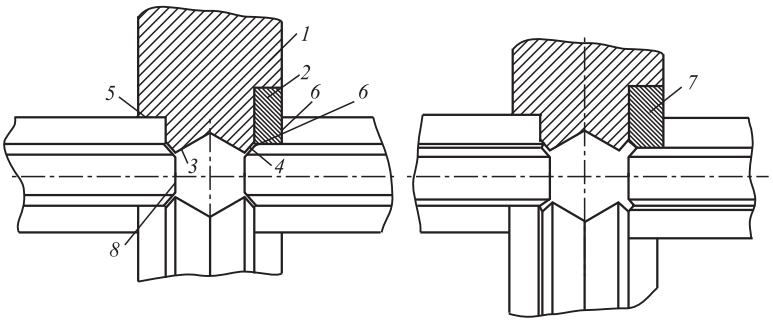


Рис. 9. Замковый калибр повышенной жесткости:

1 — валок; *2* — сменное кольцо; *3* — ручей горизонтального валка; *4* — выпуск; *5*, *6* — контактные поверхности замкового участка; *7* — сменное кольцо, отличное от кольца *2* по диаметру и ширине

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Старостин Ю.С.** Инновационные технологии на основе прессования. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. С. 64.

2. **Барков Л.А., Самодурова М.Н., Латфулина Ю.С. и др.** Процессы и деформирующее оборудование для получения титановых тонкостенных профилей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. № 5. С. 22—32.

3. **Перспективы** повышения качества титановых прутков при использовании 10-клетьевого блока на стане "250" / Ю.М. Сигалов, Бахтинов Ю.Б., Комаров В.М., Козлов А.Н. // Технология легких сплавов. 2012. № 3. С. 88—95.

4. **Барков Л.А., Выдрин В.Н., Пастухов В.В.** Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием. Челябинск: Металлургия, Челябинское отд-ние, 1988. С. 304.

5. **Барков Л.А., Самодурова М.Н.** Оборудование и технология обработки давлением труднодеформируемых уплотняемых материалов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2006. № 11. С. 155—161.

6. **Барков Л.А., Самодурова М.Н., Латфулина Ю.С. и др.** Процессы и деформирующее оборудование для получения титановых тонкостенных профилей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. № 5. С. 22—32.

7. **Барков Л.А.** Производство экономичных профилей прокаткой с многосторонним обжатием // Авиационная промышленность. 1983. № 3. С. 22—31.

8. **Барков Л.А., Брышко П.А., Комаровский И.И. и др.** Холодная прокатка шестигранных прутков из сплава ВТ16 // Технология легких сплавов. 1976. № 9. С. 22—27.

9. **Выдрин В.Н., Барков Л.А., Комаровский И.И. и др.** Холодная прокатка титановых профилей в многовалковых калибрах // Авиационная промышленность. 1978. № 3. С. 54—55.

Леонид Андреевич Барков, д-р техн. наук,
barkovla@susu.ac.ru;
Марина Николаевна Самодурова, канд. техн. наук;
Юлия Сергеевна Латфулина

УДК 621.762.227

В.Н. Гадалов, О.В. Винокуров, В.И. Савельев, А.А. Толкушев, И.В. Ворначева
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)

Изучение быстрозакристаллизованных порошков из отходов титановых сплавов ОТ-4 и ВТ20 после электроимпульсной обработки

Представлены исследования порошков — отходов титановых сплавов (ОТ-4 и ВТ20), полученных после электроимпульсной обработки на стандартном промышленном оборудовании.

Ключевые слова: быстрозакристаллизованный порошок; титановый сплав; электроэрозионное диспергирование.

The studies of powders — titanium alloys wastes (OT-4 and VT 20) obtained after electropulse treatment on standard industrial equipment are presented.

Keywords: fast-crystallized powder; titanium alloy; EDM dispersion.

Методом электроэрозионного диспергирования получают быстрозакаленные порошки металлов, сплавов и соединений металлов с металлами и неметаллами [1]. Диспергированию можно подвергать материалы в любом виде. Это могут быть отходы обработки резанием (стружка), отходы после операций вырубки из листа, обрезки облоя, поковки, профилированные изделия, спеченные и неспеченные порошковые изделия.

В машиностроительном производстве широко применяют промышленные установки электроимпульсной обработки, в результате работы которых образуются порошки обрабатываемого материала, являющиеся отходами производства и подлежащие дальнейшей утилизации. Изучение свойств порошков-отходов электроимпульсной обработки для определения возможных областей их применения является актуальной задачей.

Проведены исследования порошков титановых сплавов ОТ-4 и ВТ20, получаемых в процессе прожигания отверстий в листах на промышленной установке 4Е724. Процесс электроэрозии протекает в диэлектрической среде, состоящей из керосина марки КО и минерального масла марки И-21. По данным работы [2] выбор среды диспергирования оказывает влияние на эрозию анода и катода, так как на разложение среды затрачивается определенная энергия, которая определяется энергетическими характеристиками среды и электрическими параметрами процесса. Изменение емкости системы анод—катод приводит к изменению состава газа, выделяемого разлагающейся средой, и, соответственно, к изменению затрат энергии на разложение. Увеличение энергии импульса приводит к увеличению эрозии анода и катода, но не влияет на затраты энергии на разложение изолирующей среды.

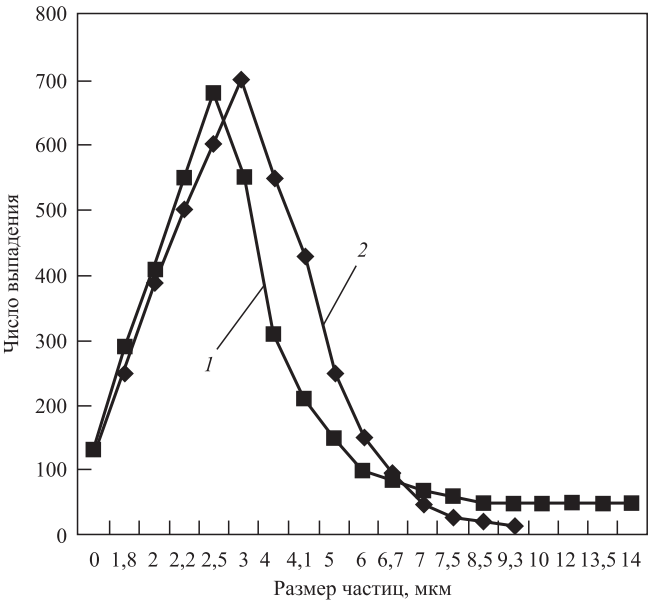
В связи с этим не варьировали емкостью и энергией импульса, так как оба эти параметра не влияют на дисперсность получаемого порошка. Она зависит от длительности импульса. Анализ дисперсного состава порошка, получаемого на установке 4Е724, проводили по методическим рекомендациям, изложенным в [3].

Гранулометрический (дисперсионный) состав порошка определяли дифференциальным способом. Учитывая возможности оценки фракционных размеров частиц, использовали метод световой микроскопии для выбора проб и устранения конгломерирования. Разрушение конгломератов осуществляли в среде спирта на ультразвуковой установке УЗУ-0,25, пробу наносили на подложку из полированной алюминиевой пластинки.

Окончательный анализ дисперсного состава порошка выполняли на электронном микроскопе РЭМ-200, позволяющем оценить размеры частиц в диапазоне 0,01...10,0 мкм при фиксированном увеличении. Исследование препарированной пробы проводили на фотоснимках. Учитывая размер частиц (в основном не свыше 10 мкм), просматривали и отснимали не меньше 20 полей.

Средний размер частиц порошка оценивали по средней длине хорды τ, отсекаемой границами частиц на случайной секущей, так как по данным работы [3], эта величина дает наиболее устойчивые результаты. Физический смысл средней длины хорды: $\tau = 4/S_V$, где S_V — удельная поверхность частиц порошка. Установлено также, что отношение удельной поверхности к удельному объему связано с τ линейно. Оценка среднего пространственного диаметра D частиц по τ не требует ввода допущений о форме частиц.

По результатам первичных замеров отрезков случайных секущих построена экспериментальная кривая распределения размеров частиц. Чтобы определить по ней основные характеристики истинного распределения частиц по размерам τ — средний размер и его дисперсию σ_L, т.е. ширину распределения размеров, необходимо знать закон распределения и установить, какому из известных теоретических законов соответствует полученное распределение или подобрать его описывающую эмпирическую формулу. Знание закона распределения и степени отклонения от него может быть использовано для характеристики процесса, формирующего исследуемый порошок. Экспериментальная кривая распределения замеров размеров частиц приведена на рисунке. Размеры частиц металлических, карбидных, оксидных и других порошков в зависимости от способа получения и свойств диспергируемого материала могут быть распределены по нормальному, логарифмически нормальному и нормальному закону для кубических корней из размеров частиц [4].



Распределение длин хорд, отсекаемых границами частиц порошка титанового сплава на случайных секущих:
1 — ОТ-4; *2* — ВТ20

Использование комплекса стереологических характеристик позволяет воссоздать картину формирования частиц порошка в процессе диспергирования материала. Были выполнены исследования по морфологии частиц (форма и двугранные углы), определению удельной поверхности частиц и поверхности, отнесенной к единице массы.

Наиболее полная информация о процессе диспергирования вещества может быть получена наряду с исследованиями по дисперсности порошка, т.е. по распределению размеров порошинок, по удельной поверхности и из морфологического анализа. Основной морфологической характеристикой порошка является форма составляющих его частиц. Форма частиц предопределяется условиями его образования. Тем не менее это качественная характеристика и преимущественное ее применение может привести к заблуждениям при сопоставлении свойств генетически неидентичных порошков. Поэтому существует количественная морфологическая характеристика порошков. Она осуществляется через систему численных критериев формы.

Для большинства порошков, имеющих форму частиц, отличную от полиэдров, ис-

пользуют метод безразмерных соотношений между основными геометрическими параметрами, присущими данному набору частиц. Эти соотношения называются коэффициентами формы или форм-факторами [2]. Основными геометрическими параметрами служат: V — объем частицы, мм^3; S — поверхность, мм^2; $F_{ср}$ — средняя площадь сечения (площадь сечения проекции частицы), мм^2; $H_{ср}$ — средняя высота, мм; L — характерный линейный размер, мм; $d_{ср}$ — средний размер частиц, мм; d_V — эквивалентный диаметр (шара с объемом, равным объему частиц) мм; d_p — проекционный диаметр (диаметр круга с площадью, равной площади проекции частицы), мм; L_p — проекционный периметр, мм.

Факторы формы, вычисленные по этим параметрам, могут быть разнообразными и выбор их определяется способом определения тех или иных параметров и возможностью использования форм-факторов в соотношениях, связывающих физико-механические свойства дисперсных материалов и твердых порошковых тел. Метод случайных секущих для определения распределения частиц по размерам, по вычислениям длин хорд позволяет вычислить факторы формы $K_{ф1}$ и $K_{ф2}$, отражающие соотношение между средней длиной хорд τ, их числом N и шагом между секущими линиями Δ,

$$K_{ф2} = 1{,}128\sqrt{\frac{L}{N\Delta}}. \qquad (1)$$

Средняя длина хорды, определенная по 458 отрезкам, составляет $\approx$3,788 мм при шаге секущих 0,25 мм. Следовательно, коэффициент $K_{ф2}$ = 0,021. Удельная поверхность, вычисленная по формуле $S_V = 4/\tau$, составляет 1,06 мм$^{-1}$ для данного случая. Метод позволяет также определить поверхность частиц, отнесенную к единице массы порошка:

$$S_\omega = \frac{S_V}{1000\gamma}, \qquad (2)$$

где γ — плотность материала.

Для порошка титановых сплавов, полученных электроэрозионным способом, величина S_ω = 0,23 м^2/г в пределах анализируемой пробы. Такое невысокое значение поверхности порошка не характерно для ультрадисперсных порошков, размеры частиц которых составляют 1000 Å и меньше. Поэтому целесообразно определить средний диаметр частиц порошка по результатам замеров длин хорд пересечений случайных секущих, нанесенных с определенным шагом на фотоснимки проб, и установить закон распределения.

Количество микрочастиц в пробе с диаметром, относящимся к конкретному интервалу длин хорд, вычисляли по формуле

$$N_K = \frac{4}{\pi\Delta^2}\left(\frac{U_K}{2K-1} - \frac{U_K}{2K+1}\right), \qquad (3)$$

где U — число хорд на 1 мм длины секущей прямой.

Индекс "K" означает соответствующую группу разбивки длин хорд по размерам. В эксперименте таких групп 20. Величина Δ принята равной 0,3 мкм. Пределы длин хорд и распределение их по размерам приведены в табл. 1.

1. Распределение длин хорд секущих по группам

Номер группы K	Пределы длины хорд, мм	Число длин хорд на 1 мм секущей
1	0,7...1,0	0,029
2	1,1...1,4	0,029
3	1,5...1,8	0,068
4	1,9...2,2	0,105
5	2,3...2,6	0,05
6	2,7...3,0	0,088
7	3,1...3,4	0,007
8	3,5...3,8	0,047
9	3,9...4,2	0,032
10	4,3...4,6	0,029
11	4,7...5,0	0,029
12	5,1...5,4	0,037
Всего	0,7...5,4	0,550

Количество микрочастиц каждой группы и относительный вклад частиц каждой размерной группы представлены в табл. 2.

Из полученных величин можно определить удельную поверхность микрочастиц. Число хорд всех размеров на 1 мм секущей идентично среднему числу пересеченной секущей с линиями границ частиц порошка в пробе m.

2. Количество микрочастиц 12 размерных групп, отнесенное к мм^3 порошка

Номер группы K	Количество микрочастиц	
	10^3 мм^3	%
1	266	38,4
2	53,2	7,6
3	22,4	3,6
4	126	17,4
5	46,2	6,6
6	105	15,0
7	32	5,6
8	16,8	2,2
9	4,2	0,6
10	2,8	0,2
11	4,2	0,6
12	15,4	2,2
Всего	694,2	100,0

Удельную поверхность определяли по основной формуле метода случайных секущих

$$\sum S = 2m = \frac{6474}{4590} = 1,4 \text{ мм}^{-1}. \quad (4)$$

Получено хорошее совпадение результатов определения удельной поверхности по формуле $S_V = 4/\tau$ и формуле для метода случайных секущих (1,06 и 1,4 мм$^{-1}$ соответственно). Для характеристики полидисперсной системы, которой является отобранная для исследований проба порошка, необходимо вычислить также средний размер частиц ν и среднее квадратичное отклонение размера $\sigma\{L\}$. Средний размер частиц, представляющий взвешенное среднее арифметическое значение размеров частиц полидисперсной системы вычисляли по формуле

$$\nu = \frac{N_1L_1 + N_2L_2 + \ldots + N_kL_k}{N} = \frac{n}{N}, \quad (5)$$

где N — общее число частиц всех размеров в пробе;

n — число сечений частиц, равное числу хорд;

L_k — размер частицы k-го размера.

Число сечений частиц размерами 0,7...5,4 мкм определено при обработке фотоснимков и в табл. 1 выражено как число длин хорд на 1 мм секущей. Общее количество частиц всех размеров в единице объема мм^3 приведено в табл. 2. Таким образом, средний размер частиц ν = 5 мкм. Среднее квадратичное отклонение размеров микрочастиц исследуемого порошка:

$$\sigma^2\{L\} = \nu^2 - (\overline{\nu})^2. \quad (6)$$

В этой формуле необходимо вычислить среднее арифметическое значение квадратов размеров частиц. Из основной формулы метода случайных секущих для пространства в случае полидисперсной системы микрочастиц следует:

$$\sum S = \pi \sum L_i^2 N_i = 2m, \quad (7)$$

откуда

$$\nu^2 = \frac{1}{N}\sum L_i^2 N_i = \frac{2m}{\pi N}. \quad (8)$$

Для исследуемого порошка ν^2 = 5,83 мкм и $\sigma^2\{L\}$ = 0,83 мкм.

Полученный порошок имеет следующие стереологические характеристики:

Средний размер микрочастиц, мкм 5,0

Среднее квадратичное отклонение, мкм . . .0,83

Количество микрочастиц . . . . . .694,2·10^3

Коэффициент вариации 0,166

Фактор формы $K_{ф2}$ 0,021

Приведенные величины совместно с установленным законом распределения частиц по размерам позволяют сделать предположения о процессе формирования продуктов эрозии при электроимпульсном диспергировании сплавов титана в диэлектрической среде. В общем случае при анализировании процессов, протекающих при диспергировании материала под воздействием электрического импульса, необходимо учитывать, что при оплавлении и испарении в дальнейшем размер частиц и их морфология определяются процессами роста частиц.

Как было показано в работах [1, 5], высокие давления, возникающие в ударной волне, распространяющиеся по диспергируемому материалу, и высокие температуры в канале разряда, а следовательно, и высокие давления в результате расширения диспергирующей среды на фронте распространения волны

сжатия обеспечивают необходимые условия для конденсации в жидкое состояние материала из парообразного. Дальнейшее формирование частиц идет за счет коалесценции жидких капель и, по всей вероятности, процесс заканчивается к моменту снижения температуры во фронте волны расширения до температур конца кристаллизации в условиях высоких давлений.

Таким образом, процесс образования частиц делится на два этапа. Первый этап — инкубационный, длительность 10^{-5} с, когда происходит конденсация пара до критического размера капель. За этот период давление в волне может значительно упасть и дальнейшая конденсация прекращается. Вся паровая фаза превращается в жидкость в капельном состоянии с частицами критических размеров. Оценку критических размеров зародышей частиц из парообразной фазы не проводили.

На втором этапе (длительность $10^{-3}...10^{-2}$ с) происходит быстрая коалесценция зародышей в частицы и частиц между собой. При этом не установлено, как зависит размер частиц в конце второго этапа от плотности зародышей и скорости убывания давления во фронте волны сжатия, а также от скорости охлаждения области пространства, в которой идет процесс коалесценции зародышей и частиц. Процесс образования зародышей будет обусловлен также плотностью вещества в парообразном состоянии, находящегося в сферической области фронта волны сжатия.

Количество вещества, попадающего в парообразном состоянии во фронт волны сжатия, определяется из общих энергетических показателей величиной энергии импульса, давление во фронте волны сжатия — температурой в канале разряда и свойствами среды. Образование частиц из жидкой фазы лимитируется процессом диспергирования жидкости, образованной в момент расплавления. Диспергирование жидкости происходит в результате взрывного характера расширения канала дуги, о чем свидетельствует определенная экспериментально различная по времени скорость разлетания частиц материала [5]. Процесс диспергирования длится несколько микросекунд.

На втором этапе идет процесс коалесценции диспергированных капель жидкости. Но, по-видимому, доля частиц, образованных по двум этапам из жидкого состояния, незначительна. В основном, образование частиц из жидкой фазы происходит в результате диспергирования и отвердевания капель жидкости. Таким образом, образование ультрадисперсных порошков может происходить преимущественно из паровой фазы, доля которой тем выше, чем выше температура в канале разряда и, соответственно, во фронте волны сжатия и чем кратковременнее длительность процесса.

Заключение. Исследованы порошки титановых стплавов ОТ-4 и ВТ-20, полученных путем электроэрозии. Рассмотрен процесс формирования частиц порошка. Установлено, что образование ультрадисперсных порошков может происходить из паровой фазы.

Оценка форм частиц методом случайных секущих показала, что средняя длина хорды составляет ≈ 3,788 мм; удельная поверхность 1,06 мм$^{-1}$; поверхность частиц, отнесенная к единице массы порошка 0,23 м^2/г; удельная поверхность микрочастиц 1,4 мм$^{-1}$; средний размер частиц 5 мкм при среднем квадратическом отклонении 0,83 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исследование** быстрозакристаллизованных порошков на основе титана и никеля, полученных электроэрозионным диспергированием: возможности их компактирования / В.Н. Гадалов, С.В. Сафронов, А.А. Толкушев и др. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2015. 119 с.

2. **О затратах** энергии на химические процессы при электроэрозионной обработке / Н.С. Пегуро, А.Н. Меркурьев, В.И. Голдин и др. М.: Наука, 1966. С. 53—62.

3. **Диагностика** металлических порошков / В.Я. Буланов, Л.И. Кватер, Т.В. Долгаль и др. М.: Наука, 1983. 256 с.

4. **Материаловедение:** учебник / В.Н. Гадалов, С.В. Сафронов, Д.Н. Романенко и др. М.: АРГАМАК-МЕДИА: ИНФРА-М, 2014. 272 с.

5. **Металлография** металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, Е.В. Агеев и др. М.: ИНФРА-М, 2011. 468 с.

Владимир Николаевич Гадалов, д-р техн. наук,
Gadalov-VN@yandex.ru;
Владислав Игоревич Савельев;
Олег Витальевич Винокуров, канд. техн. наук;
Андрей Александрович Толкушев, канд. техн. наук;
Ирина Валерьевна Ворначева

Б.В. Лохман *(ООО "ОБО Беттерманн Производство")*

Открытие завода холдинга "ОБО Беттерманн" в Липецке

29 сентября 2016 г. на территории Особой экономической зоны "Липецк" состоялось торжественное открытие производственного центра немецкого холдинга "ОБО Беттерманн" (OBO Bettermann), специализирующегося на производстве кабеленесущих систем, систем молниезащиты и крепежных изделий.

Новый производственный центр в Липецке является одной из крупнейших и девятой по счету площадкой холдинга. В церемонии открытия приняли участие полномочный представитель Президента РФ в ЦФО А.Д. Беглов, глава Администрации Липецкой области О.П. Королев, президент холдинга "ОБО Беттерманн" Ульрих Беттерманн, другие высокопоставленные лица и технические специалисты.

"ОБО Беттерманн" — международный холдинг с центрами производства в Германии, Венгрии, ЮАР, Швейцарии, Индии, Великобритании, США и России, дочерними предприятиями и представительствами в 60 странах мира и общим количеством сотрудников более 3600 человек. Ассортимент продукции охватывает более 30 000 наименований в семи производственных направлениях. Основные потребители продукции холдинга "ОБО Беттерманн" — компании различных отраслей промышленности, инфраструктурные объекты, объекты административного и жилого фонда, индустрии отдыха и развлечений, реконструкции памятников исторического и культурного наследия.

Объем инвестиций в проект в Липецке составил более 2 млрд рублей. Производственный центр холдинга занимает 6 га. Общая площадь завода составляет 20 000 м^2. Новый промышленный объект концерна рассчитывает обеспечить более 200 рабочих мест в высокотехнологичном и высокоэффективном производстве. Проектная мощность заводского комплекса — до 5000 т металлоизделий в год.

Производственный центр холдинга "ОБО Беттерманн" в Липецке будет производить кабеленесущие системы, предназначенные для монтажа сетей электроснабжения в помещениях различного функционального назначения из высококачественной нержавеющей листовой стали и проволоки, обработанные по специальной технологии оцинкованием и полимерными составами:

- листовые перфорированные кабельные лотки с толщиной материала 0,75...1,5 мм и высотой боковой стенки 35...110 мм;
- кабельные лотки с усиленной крышкой, рассчитанной на нагрузку от хождения;
- кабельные лотки лестничного типа с высотой боковой стенки 45...160 мм;
- кабельные лотки для больших расстояний с высотой боковой стенки 110...160 мм;
- вертикальные кабельные лотки лестничного типа для средних нагрузок;
- кабельные лотки для монтажа светильников;
- модульные системы.

Также планируются к производству элементы систем крепления, включающие в себя потолочные скобы и подвесы, трапециевидные крепления, разнообразные крепежные изделия (болты, анкеры, гвозди, шурупы, подвесы и дюбели, специальные латунные болты для фиксации заземляющих проводов).

Рис. 1. Координатно-пробивной лазерный пресс Trumatic TC6000L

Рис. 2. Гильотинные ножницы с листоукладчиком

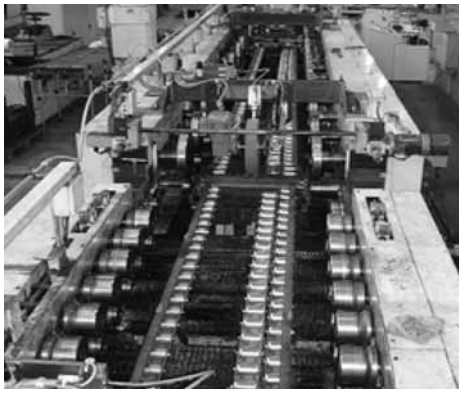


Рис. 3. Технологическая линия по производству кабельных лотков

Рис. 4. Технологическая линия производства боковых направляющих и реек

Рис. 5. Гидравлический пресс рамного типа

Рис. 6. Эксцентриковый пресс

Рис. 7. Листоштамповочный автомат

В настоящее время завод оснащен следующим производственным оборудованием и технологическими линиями: координатно-пробивной лазерный пресс (рис. 1.), гильотинные ножницы с листоукладчиком (рис. 2), кромкогибочный пресс с ЧПУ, технологическая линия по производству кабельных лотков (рис. 3), технологическая линия производства планок и разделителей, технологическая линия производства боковых направляющих и реек (рис. 4), гидравлический пресс рамного типа (рис. 5), отрезной дисковый станок, пуклевочный станок, эксцентриковый пресс (рис. 6), заклепочный станок, сварочный автомат, листоштамповочный автомат (рис. 7). Также для производства крепежных изделий будут применять холодновысадочные автоматы.

Борис Викторович Лохман, Генеральный директор

ООО "Издательство "**Инновационное машиностроение**", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 20.09.2016. Подписано в печать 02.10.2016. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.