ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Том 16 № 12 декабрь 2018

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.
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.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ОЛУНД Э., Dr. Ir.
ТУТМАН Т., Dr. Yur.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
СЕРИКОВА Е.А.
ОРЛОВА А.В.

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 "Пресса России" **39205**) или непосредственно в издательстве.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Комаров О.Н., Предеин В.В., Жилин С.Г., Абашкин Е.Е. Особенности формирования структуры и свойств отливок из алюмотермитного сплава, полученных в углеродный кокиль 531
Соловьева И.В., Овчинников В.В., Давыденко Л.В. Влияние подварок на свойства сварных соединений сплава 1151Т1, выполненных аргонодуговой сваркой 537

Кузнечно-штамповочное производство

Калюжный В.Л., Алиева Л.И., Алиев И.С., Горностай В.Н. Горячая объемная штамповка полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава с заданными механическими свойствами 543

Прокатно-волочильное производство

Поксеваткин М.И., Басова Е.М., Поксеваткин Д.М. Моделирование и оптимизация процесса формообразования сортового профиля в закрытых роликовых калибрах 548
Шапарев А.В., Савин И.А. Влияние состояния контактных поверхностей на формирование соединения стали и латуни при холодном плакировании 554

Материаловедение и новые материалы

Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В., Гарипов В.С. Термодиффузионное насыщение твердых сплавов группы ВК 560

Информация

Слинко Д.Б., Дорохов А.С., Денисов В.А., Павлов В.А. Технологические особенности восстановления валов плазменной наплавкой 566
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2018 г. 570

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.00 – машиностроение и машиноведение; 05.04.00 – энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение; 05.16.00 – металлургия и материаловедение и в базу данных Chemical Abstracts

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", 2018

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Vol. 16 № 12 December 2018

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.
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.
TREGUBOV V.I.
SHATUL'SKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHPUN'KIN N.F.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
ÖHLUND E.
TUTMANN T.

This issue prepared with assistance of specialists:
SERIKOVA E.A.
ORLOVA A.V.

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 united catalogue "Pressa Rossi" **39205**) 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

Foundry and Welding Productions

Komarov O.N., Predein V.V., Zhilin S.G., Abashkin E.E. Features of formation of structure and properties of castings from aluminothermic alloy obtained in carbon chill mould 531
Solov'eva I.V., Ovchinnikov V.V., Davydenko L.V. Effect of backing run on properties of welded joints of alloy 1151T1 performed by argon-arc welding 537

Forging and Stamping Production

Kalyuzhny V.L., Alieva L.I., Aliev I.S., Gornostay V.N. Hot die forging of hollow products from high-strength aluminum alloy with specified mechanical properties 543

Rolling and Drawing Production

Poksevatkin M.I., Basova E.M., Poksevatkin D.M. Modeling and optimization of forming process of profiled profile in closed roll calibers 548
Shaparev A.V., Savin I.A. Effect of contact surfaces state on formation of bonding of steel and brass during cold cladding 554

Physical Metallurgy and New Materials

Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V., Garipov V.S. Thermodiffusion saturation of hard alloys of VK group 560

Information

Slinko D.B., Dorokhov A.S., Denisov V.A., Pavlov V.A. Technological features of shaft reconditioning by plasma surfacing 566
Index of articles published in year 2018 570

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.00 – mechanical engineering and machine science; 05.04.00 – power, metallurgical and chemical mechanical engineering; 05.16.00 – metallurgy and material science and in Chemical Abstracts database

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

© "Innovative Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2018

УДК 621.74.04:669.01

О.Н. Комаров, В.В. Предеин, С.Г. Жилин, Е.Е. Абашкин
(Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)

Особенности формирования структуры и свойств отливок из алюмотермитного сплава, полученных в углеродный кокиль*

Представлен технологический вариант изготовления отливок из железоуглеродистого сплава, полученного в ходе алюмотермитного переплава шихты, основу которой составляют металлургическая окалина и восстановитель в виде крупки алюминиевых сплавов. Рассмотрены условия формирования структуры и физико-механических свойств изделий, получаемых по данной технологии. Обоснована область применения таких изделий.

Ключевые слова: отходы машиностроения; алюмотермия; углеродная форма; литая заготовка; экзотермическая реакция; переплав; химический состав; структура; прочность.

Technological version of manufacturing of castings from the iron-carbon alloy obtained during the aluminothermic remelting of the mixture, the basis of which is scale and reducing agent is presented. The conditions for the formation of the structure and physico-mechanical properties of products obtained using this technology are considered, and the field of application of such products is substantiated.

Keywords: mechanical engineering waste; aluminothermy; carbon form; cast preform; exothermic reaction; remelting; chemical composition; structure; strength.

Введение

Отходами машиностроительных и металлургических предприятий (ОММП) являются окалина и металлическая стружка [1]. Вторичное использование этих материалов в производственном процессе определяется рядом проблем, среди которых сложность извлечения железа из окалины и высокая доля угара при переплавке стружки в ходе применения традиционных печных процессов переработки ОММП [2]. Поиск энергоэффективных вариантов переработки ОММП с одновременным получением продукции в виде заготовок при соблюдении низких материальных затрат определяет актуальность исследований и разработок, проводимых в этом направлении [3, 4].

Таким образом, предпочтительно использование технологического процесса изготовления отливок из железоуглеродистого сплава, получаемого при алюмотермитном переплаве ОММП [5]. В основе технологии лежит окислительно-восстановительная реакция, проходящая в термитной шихте, состоящей из смеси восстановителя (сплавов алюминия) и комплекса оксидов железа (окалины).

Технологическая последовательность операций при реализации такого метода заключается в получении однородной термитной смеси, ее помещении в высокоогнеупорный реактор, запуске экзотермической реакции в этой смеси, в результате которой образуется железоуглеродистый рас-

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00.

плав, выдержке последнего в реакторе до момента разделения металлического расплава и шлака, скачивании полученного расплава в огнеупорную изложницу или литейную форму [6].

При очевидных преимуществах, связанных с возможностью получения стального расплава из ОММП вне традиционных печных агрегатов, широкого применения такой процесс в настоящее время не находит. Среди причин малой применимости алюмотермии для получения литья наиболее существенной является высокая температура расплава, достигающая 2700 °С, что существенно снижает точность прогноза структуры слитка, его химического состава и физико-механических свойств.

Серией экспериментов установлены факторы влияния на параметры конечной отливки: соотношение исходных компонентов, время выдержки расплава в реакторе, скорость разливки и т.д. Для управления температурой расплава в термитную смесь добавляют инертные компоненты [7], на время выдержки расплава в реакторе оказывают влияние геометрия и теплофизические свойства последнего (площадь основания, высота, форма, толщина и материал стенки), площадь сливного отверстия и объем расплава определяют скорость его выпуска в форму. Эффективность управления свойствами конечной отливки достигается при совместном учете рассмотренных факторов.

Одним из вариантов регулирования свойств литой заготовки является применение переплавного процесса, когда выпуск железоуглеродистого расплава осуществляют в промежуточный обогреваемый реактор, в котором проводят выдержку расплава и его доведение до требуемых характеристик перед разливкой в форму [8]. При такой технологической последовательности возможно получение однородной структуры тела отливки с переменным сечением по высоте, однако увеличиваются энергозатраты. Практический интерес представляет определение технологических ограничений (по геометрии отливок) и возможной номенклатуры литых заготовок при использовании метода получения литья из алюмотермитного металла без переплавных процессов. Исследования структуры в зависимости от высоты или наличия теплового узла отливок, полученных по такой технологии, ранее не проводилось.

Решение отмеченной проблемы актуально и определяет необходимость поиска наименее энергозатратного варианта получения отливок алюмотермией и определение возможной номенклатуры таких отливок. *Цель работы* — изучение особенностей формирования структуры и свойств отливок из алюмотермитного сплава, полученных в углеродный кокиль.

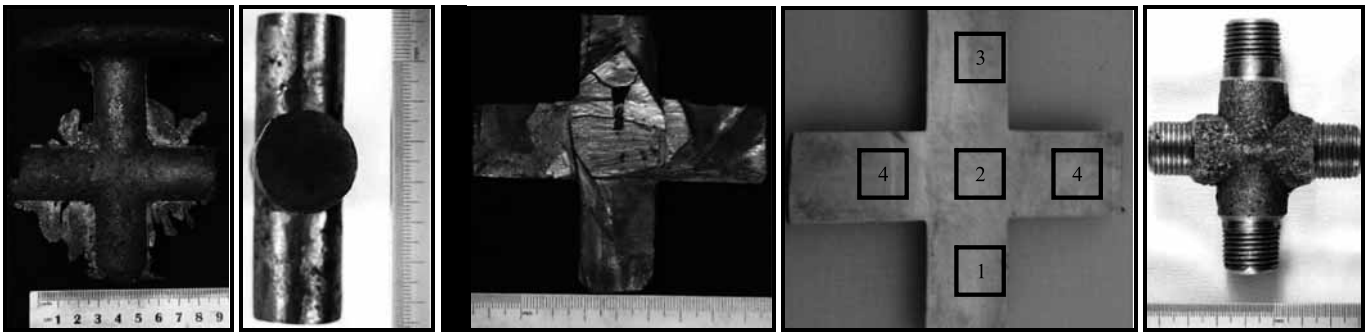
В рамках поставленной цели решали следующие задачи:

- изготовление типовой отливки прямой заливкой расплава металла, полученного алюмотермией в огнеупорном реакторе, расположенном над литейной оснасткой;
- определение химического состава получаемых отливок, исследование распределения их структуры и химического состава по высоте и по горизонтали в направлении от теплового узла, определение физико-механических свойств таких изделий;
- механическая обработка литых заготовок с проведением испытания готового изделия на герметичность под давлением, определение области применения рассматриваемого технологического процесса и возможной номенклатуры отливок, получаемых прямой заливкой алюмотермитного расплава из реактора в углеродный кокиль.

Для реализации цели и задач исследования выбрано изделие — крестообразный разветвитель гидросистемы, имеющее тепловой узел с соотношением диаметра основания и высоты 1:4 (рис. 1, *д*).

Предварительными экспериментами установлено влияние количества восстановителя и железосодержащих добавок в термитной смеси на выход металлической фазы, химический состав и свойства получаемых железоуглеродистых сплавов. Достижение максимального восстановления оксидов железа обеспечивает высокий выход металлической фазы, находящийся в увязке с требуемым химическим составом литой заготовки, который во многом определяет ее структуру [8, 9].

Количество окалины и восстановителя в экспериментальной термитной шихте составляло 75 и 25 % мас. соответственно. Получение требуемых размеров (0,2...1,5 мм) частиц компонентов термитной шихты осуществляли на ситах модели 026 по ГОСТ 29234.3—91. До начала экзотермической реакции требуется подготовка термитной шихты, при которой достигается равномерность содержания ее компонентов в объеме. Для перемешивания применяли известный



а) *б)* *в)* *г)* *д)*

Рис. 1. Литое изделие типа "крестовина":

а — отливка с элементами литниково-питающей системы, полученная в графитовой литейной форме; *б* — отливка после удаления элементов ЛПС; *в* — осевое сечение литой заготовки типа "крестовина"; *г* — участки определения микроструктур; *д* — конечное изделие — крестообразный разветвитель гидросистемы

смеситель типа "пьяная бочка" [10]. Устройство представляет собой цилиндрический сосуд вместимостью 0,03 м^3, ось вращения которого находится под углом 15° к оси цилиндра. Время перемешивания шихты 10 мин.

Химический состав компонентов термитной шихты, определенный по методикам, свойственным анализу металлов на приборе энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрального анализа Shimadzu EDX-8000, приведен в табл. 1 [11].

Формирование тела отливки осуществлялось в углеродном кокиле, изготовленном механической обработкой графитированных электродов марки ЭГ15 (ТУ 14-139-177—2003). Верхняя литниково-питающая система кокиля обеспечивает вертикальное расположение его полости при формировании тела отливки. Над кокилем размещали огнеупорный реактор, также выполненный из ЭГ15.

Перед применением кокиль и тигель нагревали до 150 °С и окрашивали огнеупорным составом, содержащим: маршалит — 20 %; жидкое стекло — 5 %; воду — 74 %; борную кислоту — 1 %. Затем в реактор помещали термитную шихту массой 2 кг, что позволило получить требуемую конфигурацию литой заготовки с учетом массового выхода термитного металла 49,7 %.

Перед осуществлением экзотермического процесса начальная температура шихты и кокиля составляла $T_ш = T_к = 25$ °С. Компоненты термитной шихты поступали в реактор засыпкой. Для активации термитной реакции использовали 0,01 кг запала, представляющего собой смесь 30 % алюминиевой пудры и 70 % железной окалины.

После активации алюмотермитный процесс проходит по известной реакции [5, 8, 9, 12] с образованием железоуглеродистого расплава, который выдерживали в реакторе в течение 20 с до завершения процесса разделения металлической и шлаковой фаз. Время выдержки расплава в реакторе зависит от объема смеси и определяется экспериментально. Расплав металла поступал в кокиль через сливное отверстие после извлечения заглушки, размещенной в донной части реактора.

После охлаждения кокилей на воздухе литые заготовки извлекали, подвергали химическому и структурному анализу, определению твердости, прочности и гидравлическому испытанию на герметичность. Визуальным осмотром полученных отливок типа "крестовина" (см. рис. 1) наличие внешних газовых дефектов в виде пор не выявлено. Визуальным осмотром продольных сечений некоторых отливок, необходимых для проведения исследований химического состава и структур в определенных участках отливок, установлено наличие вертикально ориентированной усадочной рако-

1. Химический состав основных компонентов термитной шихты, % мас.

Компонент шихты	O_2	Zn	C	Si	Mn	Fe	S	P	Al	Ni	Mg	Cr	Cu
Алюминиевый сплав	—	2,96	—	1,1	0,3	0,16	—	—	89,44	0,01	3,92	0,06	2,04
Железная окалина	22,64	—	0,15	2,96	1,19	71,5	0,03	0,03	0,7	0,19	—	0,17	0,44

2. Химический состав и твердость отливки типа "крестовина" из термитного металла в контролируемых участках отливки

Номер участка отливки (см. рис. 1, *г*)	Основные химические элементы, % мас.								Твердость, HV
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	Fe	
1	0,435	1,063	0,894	0,089	0,308	0,992	3,470	92,749	246
2	0,448	1,066	0,918	0,091	0,320	1,010	3,511	92,636	
3	0,447	1,075	0,894	0,089	0,298	0,950	3,501	92,746	289
4	0,431	1,048	0,904	0,088	0,304	0,980	3,478	92,767	271
Среднее значение, % мас.	0,440	1,063	0,902	0,089	0,308	0,983	3,490	92,724	263

вины в центральной части теплового узла, что в данном случае не является дефектом, так как подлежит механической обработке, необходимой для получения конечной конфигурации изделия.

Химический состав и микротвердость заготовок определяли в участках, показанных на рис. 1, *г*. Исследование химического состава полученных заготовок осуществляли с помощью оптико-эмиссионного спектроанализатора Q4 TASMAN 170 BRUKER. Микротвердость контролируемых участков отливки определяли в соответствии ГОСТ 2999—75.

Данные по химическому составу и микротвердости приведены в табл. 2. Согласно данным табл. 2 расхождения значений содержания химических элементов не превышает 2 % от среднего, поэтому средние значения можно использовать для характеристики химического состава отливки в целом. Равномерное распределение химических элементов обеспечивается, по-видимому, интенсивным взаимодействием компонентов термитной шихты, вызывающим их интенсивное механическое перемешивание, а также высокой температурой продуктов экзотермической реакции, активизирующей интенсивные диффузионные процессы.

Анализом многослойных электронных карт, выполненных для исследуемых участков отливки, установлено равномерное распределение основных элементов (C, Fe, Mn, Cr, Si, Cu, Al), характерных для железоуглеродистого расплава отливки. Анализ проводили методом энергодисперсионной спектроскопии на приставке OXFORD INSTRUMENTS X-Max 80 к сканирующему электронному микроскопу ZEISS EVO MA-10.

Из табл. 2 видно, что значения твердости в верхней части отливки (участок № 3) выше, чем в участках № 1 и № 2. Этот участок отливки сформирован последними порциями металла, характеризующегося меньшими значениями температуры, чем у металла попавшим в кокиль первым. Картина распределения химического состава в объеме литой заготовки во многом определяется теплофизическими условиями затвердевания, которые влияют на формирование структур участков отливки.

При определении микроструктуры металла отливок использовали оптический микроскоп AXIO VERT A1 с цифровой камерой AxioCam ERc5s. Для определения микроструктуры поверхность отливок из термитного сплава полученные шлифы образцов обрабатывали реактивом "Ниталь" (4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте) [13]. На рис. 2 приведены структуры, характерные для исследуемых участков отливки.

Из рис. 2, *б* видно, что структура изменяется в зависимости от высоты отливки. Это происходит вследствие снижения температуры во время заливки расплавом формообразующей полости кокиля. Уменьшение температуры по окончании заливки приводит к появлению дендритной структуры в зоне литейной прибыли. По всему телу отливки по белым участкам феррита выделяются мартенситные иглы и включения шаровидного перлита. Пластинчатый перлит локализован отдельными участками темного цвета. Структура характерна для литого состояния и представляет собой смесь фаз феррита, перлита и мартенсита.

Относительно равномерный химический состав в различных участках отливки и незначительное изменение структуры дают

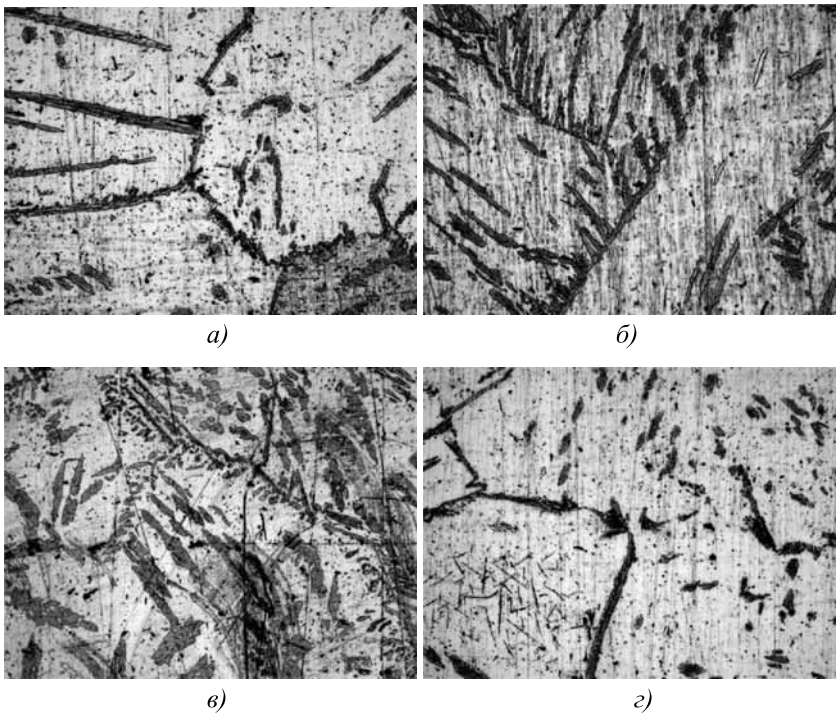


Рис. 2. Микроструктуры участков отливки (×200):
а — 1; *б* — 2; *в* — 3; *г* — 4

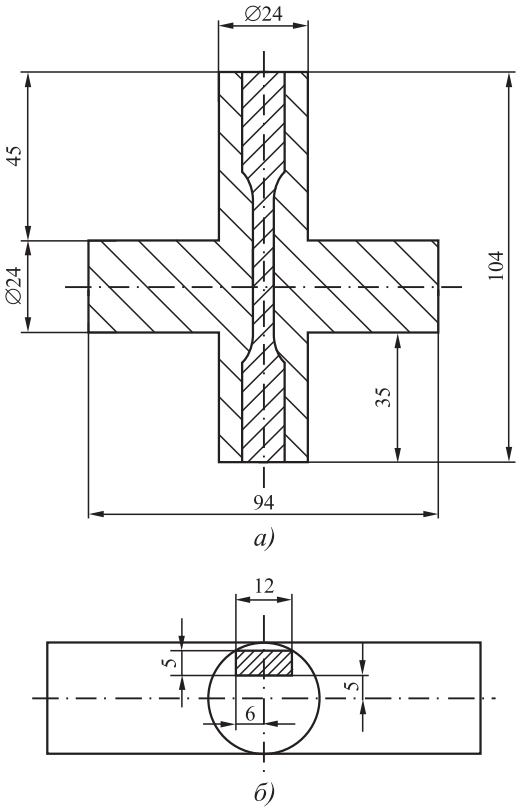


Рис. 3. Схема вырезки образцов для испытания на разрыв:
а — фронтальное сечение; *б* — вид сверху

основания полагать, что прочностные характеристики металла изделия не будут иметь значительных отличий в его различных участках. Исходя из отмеченного выше, образцы металла для определения прочности на разрыв вырезали согласно схеме, представленной на рис. 3, позволяющей получить бездефектный образец.

Образцы на разрыв изготовляли в соответствии с ГОСТ 1497—84. Исследование предела прочности на разрыв проводили на универсальной испытательной машине AG-X plus SHIMADZU при постоянной скорости перемещения захватов 0,05 мм/с. На рис. 4 приведена зависимость напряжения от деформации, возникающего при испытании образцов на разрыв.

По достигаемым значениям предела прочности $\sigma_в$ и относительного удлинения δ материал отливки соответствует углеродистым сталям обыкновенного качества, предел текучести — легированным сталям. Из рис. 4 видно, что относительное удлинение образца на участке пропорциональности составляет 0,035δ; участки текучести и самоупрочнения не выражены и практически совпадают, упругопластическая составляющая деформации наблюдается почти до момента разрушения образца, а на зону критических деформаций приходится не более 0,24δ. Такое напряженно-деформированное состояние при отсутствии площадки текучести характерно для так называемого пластично-хрупкого разрушения, которое проявляется преимущественно у низколегированных

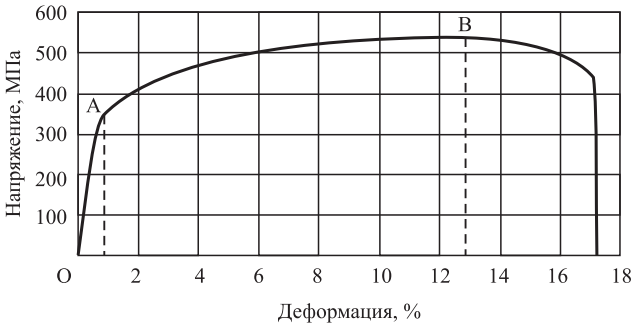


Рис. 4. Зависимость напряжения от деформации при разрыве:
$\sigma_т$ = 417 МПа; $\sigma_в$ = 536 МПа; δ = 17,1 %; OA — участок пропорциональности; B — начало зоны критических деформаций

сталей или прошедших специальную термическую обработку, поэтому эксплуатация изделий из этого материала в условиях знакопеременных нагрузок должна быть ограничена. Относительная деформация при эксплуатации таких изделий не должна превышать $\varepsilon = 0{,}2$ %.

Следующий этап исследований — определение эксплуатационных свойств готового изделия. Для этого от отливок, изготовленных по представленной технологии, отделяли элементы литниково-питающей системы. Заготовки подвергали механической обработке сверлением для получения внутренних каналов. Элементы резьбовых соединений на 1/2 дюйма получали с учетом требований ГОСТ 10549—80. Масса полученного изделия составила 0,235 кг. Готовое изделие успешно прошло гидравлические испытания на герметичность под давлением 1,6 МПа (согласно требованиям СН 298-65), в результате чего установлена эксплуатационная стойкость полученного изделия.

Заключение. Экспериментальный способ получения отливок из железоуглеродистых термитных сплавов дает возможность изготовлять заготовки со специфическими эксплуатационными свойствами, позволяющими использовать такие изделия в различных отраслях.

Отливки, полученные из железоуглеродистого сплава экзотермическим переплавом термитной шихты при $T_ш = T_к = 25$ °С, не имеют литейных дефектов, связанных с газовой пористостью и недоливами, характеризуются равномерностью распределения химических элементов и высокой герметичностью.

Низкая себестоимость литья, обусловленная отсутствием необходимости применения традиционных плавильных агрегатов, сокращением времени получения отливки и использованием ОММП в качестве компонентов термитной шихты. На основании экспериментальных данных можно прогнозировать сохранение требуемых прочностных характеристик при эксплуатации изделия. Содержание в химическом составе металла заготовок Al > 3 % позволяет использовать изделие в условиях агрессивных сред. Экспериментальные изделия, полученные по представленной технологии, применяют на опытных установках в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Использование** термитных материалов в технологиях получения стальных отливок / И.Г. Сапченко, О.Н. Комаров, С.Г. Жилин. Владивосток: Дальнаука, 2008. 166 с.
2. **Нислицина Н.Г.** Рециклинг окалины // Литье и металлургия. 2011. № 3 (62). С. 167—170.
3. **Резервы** экономии металла в литейном производстве / П.А. Вареник, Г.Д. Хуснутдинов, Ю.П. Зятковская, Л.В. Краля // Процессы литья. 1990. № 1. С. 84—87.
4. **Использование** алюминиевого сплава с высоким содержанием примесных элементов в качестве восстановителя для получения сортовых марок сталей при алюмотермии / В.В. Предеин, А.В. Попов, О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, А.И. Евстигнеев // Ученые записки КнАГТУ. 2017. № III-1 (31). С. 106—114.
5. **Малоотходная** технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями / В.А. Новохацкий, А.А. Жуков, Ю.И. Макарычев. М.: Машиностроение, 1986. 64 с.
6. **The influence** of structure on strength properties of casting steel obtained with the use of thermite materials / O.N. Komarov, S.G. Zhilin, D.A. Potianikhin, V.V. Predein, E.E. Abashkin, A.A. Sosnin, A.V. Popov // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1785. P. 040027-1.—040027-5.
7. **Влияние** начальных температур шихты и формы на структуру и физико-механические свойства литых заготовок, получаемых при алюмотермитном переплаве / В.В. Предеин, О.Н. Комаров, А.В. Попов, С.Г. Жилин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 4. С. 24—40.
8. **Устройство** для получения отливок из железоуглеродистых сплавов: пат. № 2658682 РФ / О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, А.И. Евстигнеев. Заявл. 14.04.2017; опубл. 22.06.2018, Бюл. № 18.
9. **Получение** слябовых заготовок из кипящей стали для прокатного производства методом металлотермии / О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, В.В. Предеин, Е.Е. Абашкин, А.В. Попов // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 3. С. 136—140.
10. **Сафронов В.Я.** Справочник по литейному оборудованию. М.: Машиностроение, 1985. 320 с.
11. **Влияние** процессов индукционного переплава стали, полученной алюмотермией, на структуру и свойства отливок / О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, В.В. Предеин, А.В. Попов // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 7. С. 291—298.
12. **Получение** отливок повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин, В.В. Предеин // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 11. С. 6—11.
13. **Костин П.П.** Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.

Олег Николаевич Комаров, канд. техн. наук;
Валерий Викторович Предеин;
Сергей Геннадьевич Жилин, канд. техн. наук,
zhilin@imim.ru;
Евгений Евгеньевич Абашкин

УДК 621.791.5:669.715

И.В. Соловьева *(АО ВПК "НПО машиностроения", г. Реутов),*
В.В. Овчинников, Л.В. Давыденко *(Московский политехнический университет)*

Влияние подварок на свойства сварных соединений сплава 1151Т1, выполненных аргонодуговой сваркой

Проведен сравнительный анализ влияния подварок на механические свойства сварных соединений листов жаропрочного сложнолегированного алюминиевого сплава 1151Т1, полученных аргонодуговой сваркой. Установлено, что подварки снижают значения прочности сварного соединения, прочности и угла изгиба металла шва. Для исправления дефектных участков сварных соединений возможно использование двухкратной подварки, выполняемой ручной аргонодуговой сваркой.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка; алюминиевый сплав 1151Т1; сварные соединения; подварки; механические свойства.

The comparative analysis of the impact of products on the mechanical properties of welded joints of heat-resistant aluminum alloy 1151T1 sheets received by argon-arc welding is performed. It is established that the suburbs will reduce the value of the strength of the welded joint, strength and angle weld metal. To remedy the defects of weld joints may use multiple suburbs performed by manual argon-arc welding.

Keywords: argon-arc welding; aluminum alloy 1151T1; welded joints; suburbs; mechanical properties.

Введение. Алюминиевый сплав 1151Т1 системы Al—Cu—Mg относится к группе дюралюминов. После закалки и старения он имеет двухфазную структуру: твердый раствор и интерметаллиды. Это позволяет повысить прочность сплава до 450 МПа при одновременном снижении пластичности (относительное удлинение на уровне 15 %), что усложняет сварку жестких конструкций вследствие образования горячих трещин [1].

Сплав 1151Т1 на основе системы Al—Cu—Mg предназначен в качестве конструкционного материала в сварном герметичном или негерметичном вариантах для изделий машиностроения, работающих кратковременно до температуры 450 °С и длительно до 200 °С [2].

При аргонодуговой сварке конструкций из алюминиевых сплавов в условиях производства возможно образование дефектов в виде трещин, цепочек газовых пор и включений оксидной пленки, приводящие к снижению прочности соединений и образованию течей в герметичных отсеках. Эти дефекты существенно снижают работоспособность сварных соединений. Отрицательное влияние внутренних дефектов наиболее сильно проявляется в условиях эксплуатации сварного соединения при циклическом нагружении, а также в условиях пониженных температур [3, 4].

Присутствие пор и включений оксидной пленки вблизи зоны сплавления снижает предел выносливости на 25...40 % по сравнению с бездефектными швами (особенно для высокопрочных термически упрочняемых алюминиевых сплавов) [5]. В связи с этим существуют нормы допустимых внутренних дефектов, количество, размер и расположение которых в шве строго регламентированы в зависимости от условий эксплуатации сварной конструкции.

При исправлении дефектов путем подварок наблюдается изменение свойств металла шва и близлежащих участков зоны термического влияния. Степень изменения свойств сварных соединений определяется технологией выполнения подварок. На рис. 1 приведены возможные варианты выполнения подварок при аргонодуговой сварке.

Цель работы — исследование влияния подварок, выполняемых ручной аргонодуговой сваркой (РАрДЭС), на механические свойства и микроструктуру сварных соединений сплава 1151Т1, полученных автоматической аргонодуговой сваркой (ААрДЭС).

Материалы и методика исследования. В качестве материала исследования использовали листы из алюминиевого сплава 1151Т1 толщиной 3,0 мм, химический состав которого приведен в табл. 1.

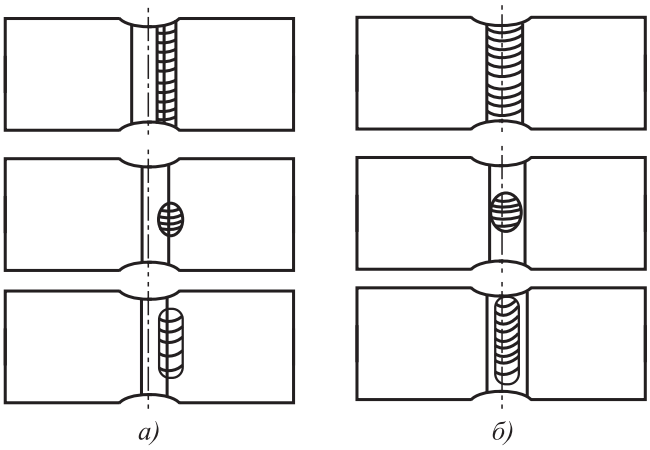


Рис. 1. Различные варианты выполнения подварок по зоне сплавления (*а*) и по металлу шва (*б*)

Механические свойства листов сплава 1151Т1: $\sigma_в$ = 460 МПа; $\sigma_{0,2}$ = 332 МПа; δ = 13,8 %. Листы из сплава 1151Т1 поставляли без технологической плакировки.

ААрДЭС осуществляли на установке для сварки протяженных прямолинейных стыков с присадочной проволокой и на переменном токе при скорости 20 м/ч. Перед выполнением сварки зону шириной 15 мм с лицевой и обратной сторон соединения подвергали зачистке шабером до металлического блеска. Для формирования проплава применяли подкладку из нержавеющей стали с отверстиями для подачи аргона.

Подварки выполняли ручной аргонодуговой сваркой. При подварках и сварке основного шва использовали присадочную проволоку Св1177.

Механические свойства сварных стыковых соединений листов из сплава 1151Т1, полученных ААрДЭС на переменном токе с присадочной проволокой Св1177, при нормальной температуре определяли по стандартной методике согласно ГОСТ 6996—66. Испытаниям подвергали образцы типа XV. Из полученных сварных соединений были изготовлены стандартные образцы для определения предела прочности при одноосном растяжении. Испытания проводили на универсальной многоцелевой сервогидравлической машины MTS810.

Для изучения микроструктуры листовых полуфабрикатов из алюминиевого деформируемого сплава 1151Т1, а также сварных соединений, применяли метод микроанализа травленых и нетравленых шлифов и электронно-микроскопический анализ. Для микроанализа шлифов применяли световой микроскоп Axiovert 40 MAT фирмы Carl Zeiss. Для анализа вырезали образцы из листов и сварных соединений. Из образцов изготовляли макро- и микрошлифы.

Для травления микрошлифов использовали реактив Келлера (водные растворы 1,5 % HCl; 2,5 % HNO_3; 0,5 HF), для травления макрошлифов — 15%-ный водный раствор NaOH (KOH).

Для электронно-микроскопического анализа изломов соединений после испытаний применяли электронный растровый микроскоп EVO-50 фирмы Carl Zeiss.

Образцы сварных соединений после автоматической аргонодуговой сварки и после подварок подвергали испытаниям на склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) и расслаивающей коррозии (РК) по ГОСТ 9.904—82.

Результаты исследований и их обсуждение. Механические свойства (предел прочности $\sigma_в$, угол изгиба α и ударная вязкость *KC*U) сварных соединений листов сплава 1151Т1 с усилением шва и без усиления, полученных аргонодуговой сваркой, приведены в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показал, что прочностные свойства сварных соединений сплава 1151Т1, выполненных ААрДЭС, выше, чем сварных соединений, полученных РАрДЭС. Коэффициент прочности *K* соединения при автоматической аргонодуговой сварке составил 0,83...0,84, а при ручной аргонодуговой сварке — 0,80...0,81.

Образцы сварных соединений листов сплава 1151Т1 с усилением и проплавом разрушались по зоне термического влияния на расстоянии 3...4 мм для РАрДЭС и 6...7 мм для ААрДЭС. Эти образцы имеют более высокую прочность по сравнению с образцами без уси-

1. Химический состав листов из сплава 1151Т1, % мас.

Легирующие элементы								Примеси	
Cu	Mg	Mn	Ti	V	Zr	Co	Be	Fe	Si
5,40	1,79	0,40	0,093	0,01	0,05	0,035	0,003	0,20	⩽ 0,05

2. Механические свойства сварных соединений листов сплава 1151Т1, полученных аргонодуговой сваркой

Образец	$\sigma_в$, МПа		α, °		*KC*U, кДж/м^2			Расстояние от зоны сплавления до очага разрушения образца, мм
	С усилением и проплавом	Без усиления и проплава	По шву	По зоне сплавления	По шву	По зоне сплавления	По зоне термического влияния	
Сварное РАрДЭС-соединение	374	349	27	22	50	36	80	3...4
Сварное ААрДЭС-соединение	387	353	30	26	52	39	98	6...7
Примечание. Приведены средние результаты испытаний по 10 образцов на вариант.								

3. Предел прочности и коэффициент прочности листов сплава 1151Т1 и их сварных соединений при испытании образцов на растяжение

Температура испытаний, °С	Основной металл	Сварное ААрДЭС-соединение		Сварное РАрДЭС-соединение	
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_в$, МПа	*K*	$\sigma_в$, МПа	*K*
20	460	387	0,84	374	0,81
200	388	349	0,90	337	0,87
300	293	219	0,75	208	0,71
350	168	144	0,86	141	0,84
400	65	65	1,0	65	1,0
450	43	43	1,0	43	1,0
Примечание. Время нагрева 15 мин; время выдержки 15 мин.					

ления и проплава, которые разрушались по металлу шва.

Образцы без усиления и проплава имеют прочность на уровне 349...353 МПа.

Сварные соединения имеют низкие значения угла изгиба 27...30° (по металлу шва).

При ААрДЭС наблюдаются более высокие значения ударной вязкости по зоне термического влияния (примерно на 14...18 %).

Так как сплав 1151Т1 является жаропрочным материалом, были проведены испытания исследуемых сплавов и их сварных соединений при температурах 20...450 °С. Для определения прочности основного металла и сварных соединений испытывали плоские образцы без снятия выпуклости сварного шва. В табл. 3 приведены результаты испытаний листов сплава 1151Т1 и их сварных соединений при повышенных температурах.

Результаты испытаний показали, что увеличение температуры испытаний способствует снижению прочности как листов сплава 1151Т1, так и их сварных соединений. Коэффициент прочности сварных соединений при этом повышается с увеличением температуры испытаний от 20 до 200 °С. Затем при нагреве до 300 °С происходит снижение коэффициента прочности сварных соединений, после чего при повышении температуры испытаний до 450 °С наблюдается рост коэффициента прочности соединений до 1 (рис. 2).

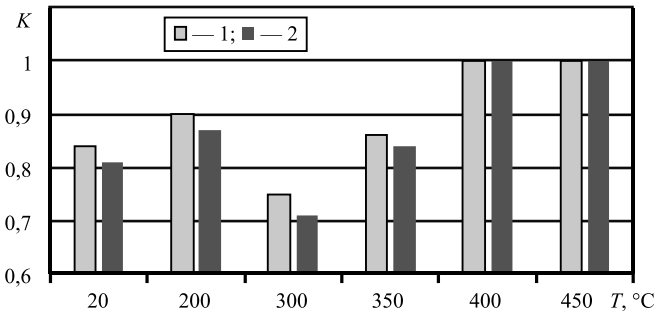


Рис. 2. Влияние температуры испытаний *T* на коэффициент прочности *K* сварных соединений сплава 1151Т1:

1 — автоматическая аргонодуговая сварка; *2* — ручная аргонодуговая сварка

4. Влияние числа подварок, выполненных РАрДЭС, на свойства сварных соединений сплава 1151Т1, полученных ААрДЭС

Образец	$\sigma_в$, МПа		α, °		*K*CU, кДж/м^2			Расстояние от зоны сплавления до очага разрушения образца, мм
	С усилением и проплавом	Без усиления и проплава	По шву	По зоне сплавления	По шву	По зоне сплавления	По зоне термического влияния	
Без подварок	387	353	30	26	52	39	98	6...7
После различного числа подварок:								
1	354	325	27	25	54	31	83	6...7
2	337	323	27	20	68	27	84	8...9
3	300	288	22	20	72	21	88	10...11

Примечание. Приведены средние результаты испытаний по 10 образцов на вариант.

Таким образом, для сварных соединений, эксплуатирующихся при рабочей температуре 350...450 °С, нивелируется разница в механических свойствах соединений, обусловленная применяемым вариантом аргонодуговой сварки.

Результаты механических испытаний (табл. 4) показали, что подварки при выполнении основного шва ААрДЭС оказывают заметное влияние на прочностные и пластические свойства сварных соединений.

Так, например, предел прочности сварного соединения сплава 1151Т1 после второй подварки снижается примерно на 13 %, а после третьей подварки — на 23 %. Установлено более резкое снижение предела прочности сварного соединения при выполнении подварок по зоне сплавления по сравнению с подварками по металлу шва.

Разрушение образцов после сварки и последующих двух подварок по металлу шва происходило по зоне сплавления, а после трех подварок — по зоне сплавления и по металлу шва — смешанное разрушение. При выполнении подварок по зоне сплавления разрушение во всех случаях наблюдалось по зоне термического влияния подварочного шва на расстоянии 4...11 мм от линии сплавления ремонтируемого шва.

Испытания сварных образцов сварных соединений на изгиб показали, что после наложения подварок незначительно уменьшается угол изгиба по шву и зоне сплавления. Разрушение образцов при изгибе, как правило, происходило по металлу шва.

Проведены исследования влияния температуры испытаний на коэффициент прочности сварных соединений сплава 1151Т1 в зависимости от числа подварок. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Установлено, что с увеличением числа подварок прочность сварного соединения снижается как при комнатной, так и при повышенных температурах испытаний. В то же время прочность соединений при температурах испытаний 400 и 450 °С с подварками и без них практически одинакова.

Физическая сущность снижения механических свойств сварных соединений при подварках связана со структурными изменениями, происходящими в металле шва и металле зоны сплавления под влиянием повторных нагревов.

При подварке сварных соединений термически упрочняемых сплавов под действием сварочного нагрева в металле шва и зоне термического влияния протекают процессы, ухудшающие механические свойства сварного соединения.

При сварке плавлением в непосредственной близости от шва наблюдается зона оплавления границ зерен. Ширина зоны оплавления зависит от режима аргонодуговой сварки.

В структуре сплава 1151 эвтектика по границам зерен выделяется в небольших количествах, что обусловлено химическим составом сплава. Структура зоны сварного шва мелкозернистая, дезориентированная, что характер-

5. Предел прочности и коэффициент прочности сварных соединений сплава 1151Т1 в зависимости от числа подварок при испытании образцов на растяжение

Температура испытаний, °С	Основной металл	Сварное АА рДЭС-соединение без подварок		После различного числа подварок					
				1		2		3	
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_в$, МПа	*K*	$\sigma_в$, МПа	*K*	$\sigma_в$, МПа	*K*	$\sigma_в$, МПа	*K*
20	460	387	0,84	354	0,77	337	0,73	300	0,65
200	388	349	0,90	306	0,79	291	0,75	263	0,68
300	293	219	0,75	208	0,71	196	0,67	202	0,69
350	168	144	0,86	131	0,78	126	0,75	120	0,72
400	65	65	1,0	62	0,95	61	0,93	57	0,88
450	43	43	1,0	43	1,0	43	1,0	43	1,0

Примечания: 1. Приведены средние результаты испытаний по 10 образцов на вариант.
2. Время нагрева 15 мин; время выдержки 15 мин.

но для случая быстрого затвердевания расплавленного металла при переохлаждении.

На рис. 3 приведены микроструктуры в различных зонах шва сварного соединения листовых полуфабрикатов из сплава 1151Т1, полученного автоматической аргонодуговой сваркой, с наложением и без наложения подварок ручной дуговой сваркой.

Микроструктура металла шва образцов после АА рДЭС состоит из α-твердого раствора, на фоне которого закристаллизовалась дендритная сетка. Степень распада твердого раствора в металле шва не одинакова — имеются участки с повышенным и пониженным содержанием эвтектики (см. рис. 3, *а*).

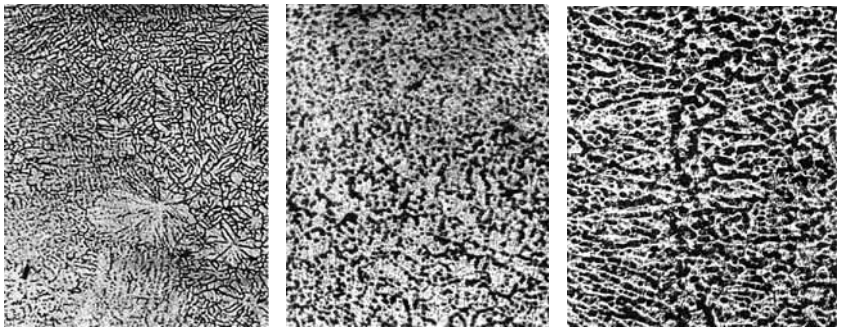
На образцах, полученных АА рДЭС с одной и тремя подварками соответственно, в сварном шве по высоте сформировались две зоны, резко отличающиеся между собой по микроструктуре. В верхней части микроструктура состоит из дендритов тонкого сложения (см. рис. 3, *б*), а в корне шва сформировалась более грубая структура. На образце с тремя подварками (см. рис. 3, *в*) зона сварного шва с тонкой структурой более глубокая, чем на образце с одной подваркой. На образце с тремя подварками в сварном шве вблизи переходной зоны произошло укрупнение дендритов.

С увеличением числа подварок ширина переходной зоны возрастает: на образце без подварок она составляет 0,7 мм, на образце с одной подваркой — 0,9 мм и на образце с тремя подварками — 1,3 мм.

Проведено комплексное исследование коррозионной стойкости сварных соединений деформируемого сплава 1151Т1. Результаты испытаний листов сплава 1151Т1 и их сварных соединений приведены в табл. 6.

Склонность к межкристаллитной коррозии наблюдается как у листов сплава 1151Т1, так и у сварных соединений с подварками и без них. Максимальная глубина МКК для сварного соединения превышает глубину МКК для листов сплава 1151Т1 примерно в 4,5—5,2 раза.

Увеличение числа подварок сварных соединений от 1 до 3 повышает глубину проникновения межкристаллитной коррозии от 0,53 до 0,77 мм.



а) *б)* *в)*

Рис. 3. Микроструктуры металла шва сплава 1151Т1 после автоматической аргонодуговой сварки (*а*), одной (*б*) и трех (*в*) подварок. ×150

6. Результаты испытаний на склонность листов сплава 1151Т1 и их сварных соединений к межкристаллитной коррозии

Тип образца	Вид сварки	Число подварок	Склонность к МКК в растворе 3 % NaCl + 1 % HCl	
			Максимальная глубина, мм	Характер коррозии
Лист	—	—	0,08	МКК
Сварное соединение	ААрДЭС	Без подварок	0,49	МКК + РК
		1	0,53	
		2	0,59	
		3	0,77	

Для сварных соединений сплава 1151Т1 (с подварками и без них) характерен смешанный характер коррозии — межкристаллитная коррозия и расслаивающая коррозия.

Выводы

1. Подварки при выполнении основного шва автоматической аргонодуговой сваркой оказывают заметное влияние на прочностные и пластические свойства сварных соединений. Предел прочности сварного соединения сплава 1151Т1 после второй подварки снижается примерно на 13 %, а после третьей подварки — на 23 %.

2. С увеличением числа подварок прочность сварного соединения снижается при комнатной и повышенных температурах испытаний. В то же время прочность соединений при температурах испытаний 400 и 450 °С с подварками и без них практически одинакова.

3. Для сварных соединений сплава 1151Т1 (с подварками и без них) характерен смешанный характер коррозии — межкристаллитная коррозия и расслаивающая коррозия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Овчинников В.В., Дриц А.М., Курбатова И.А., Гуреева М.А.** Технология сварки алюминиевого деформируемого сплава 1151 // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. № 1. С. 10—15.

2. **Фридляндер И.Н.** Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные сплавы на их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 9—17.

3. **Николаев Г.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П.** Свариваемые алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1990. 206 с.

4. **Бабаев А.В.** Влияние пор на сопротивление усталости сварных соединений // Автоматическая сварка. 1980. № 10. С. 6—10.

5. **Дриц А.М., Овчинников В.В.** Механические свойства сварных соединений листов из сплава 1565чНН // Технология легких сплавов. 2014. № 12. С. 32—39.

Ирина Владимировна Соловьева;
Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук,
vikov1956@mail.ru;
Людмила Васильевна Давыденко, канд. техн. наук

УДК 621.7-621.983

В.Л. Калюжный[1], Л.И. Алиева[2], И.С. Алиев[2], В.Н. Горностай[1]
([1]Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
[2]Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск)

Горячая объемная штамповка полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава с заданными механическими свойствами

Методом конечных элементов проведены исследования и установлены параметры технологии горячей штамповки полого изделия из алюминиевого сплава В93 с заданной проработкой структуры металла пластической деформацией для обеспечения механических свойств в стенке изделия после термической обработки. Расчетным путем определены форма и размеры исходной заготовки, температура подогрева деформирующего инструмента, сила штамповки, сила выталкивания изделия из матрицы, удельные силы на деформирующем инструменте, изменение температуры металла при формообразовании изделия, напряженно-деформированное состояние в деформированном металле, конечные форма и размеры изделия. По результатам моделирования спроектирован и изготовлен штамп для горячей штамповки и проведены экспериментальные исследования на гидравлическом прессе. Выполнены испытания на растяжение стандартных образцов, вырезанных из стенки изделия после термической обработки. Данные испытаний отвечают требованиям по механическим свойствам деформированного металла в стенке изделия.

Ключевые слова: горячая штамповка; полое изделие; алюминиевый сплав; метод конечных элементов; силовые режимы; интенсивность деформаций; экспериментальные исследования; механические свойства.

Using the finite element method researches are conducted and parameters of hot forging of hollow product from aluminium alloy V93 with necessary treatment of metal structure by plastic deformation to provide the mechanical properties in the wall of product after heat treatment are established. The shape and dimensions of the initial workpiece, temperature heating deforming die, forming's force, force of pushing the product from matrix, the specific forces on the deforming die, temperature change during forming of the product, stress-strain state in deformed metal, final shape and size of the product are determined by calculation. According to the results of modeling die for hot forging is designed and manufactured and experimental researches in hydraulic press are conducted. Tensile tests of standard samples, that were cut from the wall of the product after the heat treatment are carried out. The tests data meet the requirements for the mechanical properties of deformed metal in the wall of the product.

Keywords: hot forging; hollow product; aluminum alloy; finite element method; force modes; strain intensity; experimental researches; mechanical properties.

В последнее время для изготовления изделий с повышенной надежностью и долговечностью перед процессами горячей объемной штамповкой стоят задачи получения необходимой проработки структуры металла пластической деформацией по всему объему изделия или отдельных частей объема.

Методы и термомеханические параметры ковки на молотах и горячей штамповки на прессах изделий из цветных металлов и сплавов, в том числе и высокопрочных алюминиевых сплавов, рассмотрены в работе [1]. Для операций осадки, вытяжки, прошивки, гибки приведены элементы конструирования поковок и деформирующего инструмента. Основное внимание уделено получению необходимой формы изделий.

В работе [2] даны рекомендации и приведены примеры проектирования технологических процессов и штамповой оснастки для горячей объемной штамповки изделий на различном кузнечно-прессовом оборудовании. Также изложены особенности горячей объемной штамповки деталей различной формы из цветных сплавов.

В указанных источниках все сведения базируются на основании экспериментальных данных и производственного опыта и основное внимание уделено достижению горячим формообразованием необходимой формы изделий. Практически отсутствуют рекомендации по штамповке деталей для обеспечения заданных механических свойств в деформированном металле.

Для усовершенствования существующих и разработки новых технологических процессов горячей объемной штамповки в настоящее время используют компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Моделирование позволяет устанавливать технологические параметры и определять данные для проектирования штамповой оснастки, которые не требуют уточнения экспериментальными работами [3, 4]. В работе [5] с помощью МКЭ проведены расчетные исследования процессов горячей ковки осесимметричных деталей необходимой формы.

Возможность получения ковкой и горячей штамповкой ответственных изделий из сталей с проработкой структуры металла пластической деформацией и достижением необходимого распределения деформаций по объему изделий приведена в источниках [6—9]. Авторами этих работ показано, что проработку структуры можно оценить по конечному распределению интенсивности деформаций в деформированных заготовках. Актуальной задачей является проведение аналогичных расчетно-экспериментальных исследований для горячей штамповки деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов.

Цель работы — расчетное определение параметров и разработка технологии горячей штамповки полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава В93 с требуемой проработкой структуры металла пластической деформацией по высоте стенки.

Эскиз полого изделия из алюминиевого сплава В93 приведен на рис. 1. Изделие имеет стенку разной толщины по высоте и донную часть с постоянной толщиной. В стенке изделия необходимо обеспечить заданную проработку структуры металла пластической деформацией для получения необходимых механических свойств деформированного металла после термической обработки. Одним из способов получения таких изделий является вытяжка с утонением полой заготовки в конической матрице. Подбором формы исходной заготовки и величиной утонения стенки при формообразовании вытяжкой можно обеспечить заданную проработку структуры металла пластической деформацией.

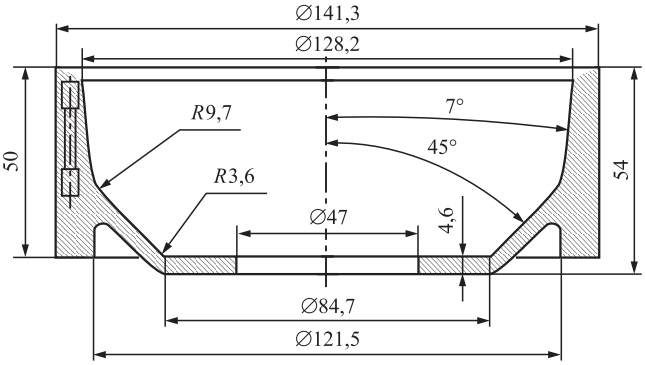


Рис. 1. Эскиз полого изделия из алюминиевого сплава В93 с местом вырезки образцов для испытаний на растяжение

Определение формы и размеров исходной заготовки, а также параметров технологии горячей штамповки выполнено компьютерным моделированием с помощью МКЭ и использованием программы DEFORM-3D.

Деформированию подвергали заготовки из сплава В93, полученные литьем. Интервал штамповки согласно рекомендациям работы [1] для сплава В93 составляет 350...430 °С. Скорость деформирования 7 мм/с и коэффициент трения 0,15 были выбраны из условий проведения дальнейших экспериментальных исследований на гидравлическом прессе ДБ2436 с использованием смазки для горячей штамповки при температуре до 450 °С LOCTITE 8191 на основе MoS_2.

Моделированием необходимо было установить предварительный разогрев деформирующего инструмента для обеспечения требуемого интервала штамповки от начала до конца формообразования.

Результаты моделирования приведены для установленных формы и размеров исходной заготовки, которые обеспечивают необходимую проработку структуры металла пластической деформацией и заданные механические свойства в стенке полого изделия после дальнейшей термической обработки. Установленные моделированием форма и размеры исходной заготовки приведены на рис. 2. Расчетные положения деформирующего инструмента и заготовки в разрезе показаны на рис. 3 (см. обложку).

Для обеспечения температурного интервала штамповки при скорости деформирования 7 мм/с инструмент необходимо подогреть до температуры 350 °С. Исходную заготовку *1* (см. рис. 3) устанавливают в матрицу *2* с конической деформирующей поверхностью для проведения вытяжки с утонением и формообразования донной части. В матрице *2* располагают

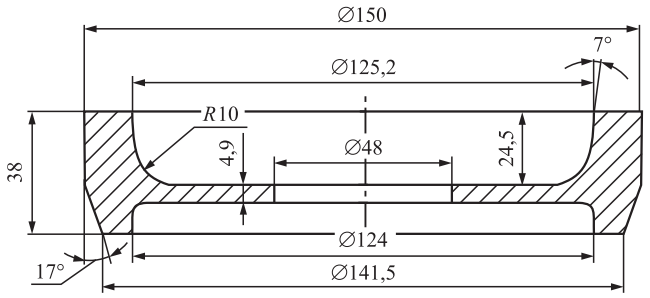


Рис. 2. Расчетные форма и размеры исходной заготовки

плиту *3* для получения донной части изделия. Деформирование выполняют пуансоном *4*. Перемещение пуансона *4* при штамповке для получения изделия *5* составляет 66 мм. Выталкивание изделия из неподвижной матрицы *2* осуществляют перемещением вверх плиты *3* (см. рис. 3, *в*).

Силовые режимы штамповки и выталкивания изделия приведены на рис. 4. На рис. 4, *а* показана зависимость силы деформирования P от перемещения пуансона S.

На этапе штамповки заготовки вытяжкой с утонением сила деформирования вначале возрастает и достигает максимального значения 180 кН при перемещении пуансона 30 мм, а далее сила штамповки уменьшается до 25 кН в конце этапа формообразования вытяжкой. На конечной стадии штамповки донной части сила деформирования увеличивается и достигает 1400 кН в последний момент штамповки.

Зависимости осевой P_a и радиальной P_r сил, которые воспринимает матрица при штамповке, от перемещения пуансона приведены на рис. 4, *б*. Осевая сила P_a сначала возрастает и имеет максимум при перемещении пуансона 28 мм, затем уменьшается до минимального значения 19 кН при завершении вытяжки с утонением и увеличивается до 1390 кН в конце штамповки.

Характер зависимости радиальной силы P_r от перемещения пуансона S аналогичен зависимости силы деформирования. Сила P_r имеет два максимума: 510 кН на этапе вытяжки с утонением и 1400 кН в конце штамповки.

Моделированием также установлена зависимость силы выталкивания P_v изделия из матрицы после штамповки от перемещения плиты S_v (см. рис. 4, *в*). Максимальное значение 40 кН получено в начале выталкивания с последующим уменьшением до момента выхода отштампованного изделия из матрицы. Приведенные данные были использованы при выборе прессового оборудования и проектировании штамповой оснастки.

Последовательность формообразования изделия с распределением температуры в деформированной заготовке приведена на рис. 5 (см. обложку). Тонкими линиями показаны контуры пуансона, части матрицы и плиты. На рис. 5—7 приведены диаметральные D и высотные H размеры детали. На рис. 5, *а* показано положение при перемещении пуансона 20 мм. Сначала происходит деформирование стенки заготовки на конической части матрицы, а далее осуществляется раздача с изгибом донной части. За время деформирования 3 с в деформированной заготовке образуются три области с разными температурами. В области стенки температура уменьшается с 430 до 410 и 418 °С, а в донной части — до 426 и 418 °С.

При перемещении пуансона 40 мм (см. рис. 5, *б*) происходят утонение стенки и увеличение высоты стенки деформированной заготовки. При этом донная часть практически не деформируется. В этой части температура снижается до 402...418 °С. В стенке деформированной заготовки температура изменяется от 377 °С в верхней части до 402 °С в нижней части. На конечной стадии штамповки стенка не деформируется, а выпол-

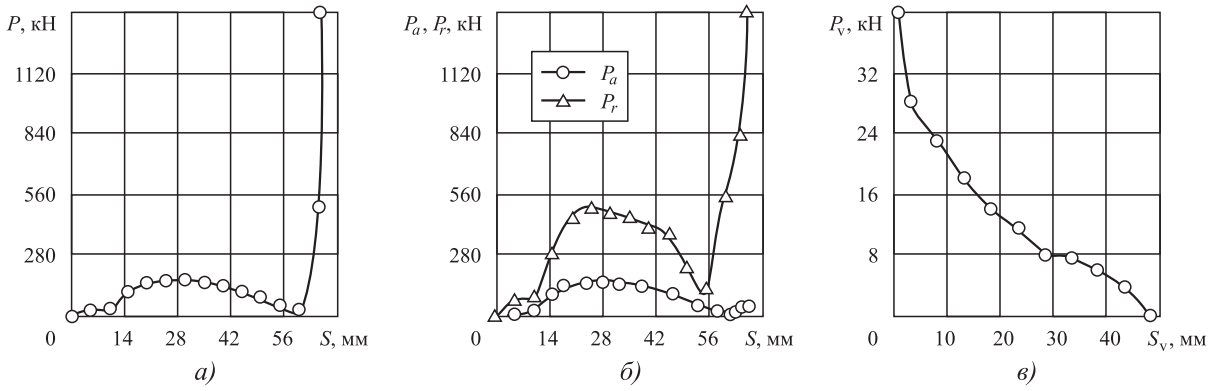


Рис. 4. Силовые режимы штамповки и выталкивания изделия

няется формообразование донной части полого изделия. Распределение температуры в конце штамповки приведено на рис. 5, *в*. Температура за время деформирования 9,4 с в области стенки снизилась до значений 370...385 °С, а в области перемычки — до 385...400 °С. Таким образом, температурный интервал штамповки соблюдается на протяжении формообразования полого изделия.

Проработку структуры металла пластической деформацией, как было указано выше, можно оценить распределением интенсивности деформаций ε_i по объему изделия после штамповки (рис. 6, см. обложку). По высоте стенки получено: ε_i = 0,26 в нижней части и ε_i = = 0,45...0,64 в остальном объеме стенки. В донной части интенсивность деформаций ε_i = 0,26...0,46.

Для проектирования штамповой оснастки необходимо знать распределение удельных сил на деформирующем инструменте. На рис. 7 приведено распределение нормальных напряжений σ_n на поверхностях пуансона и матрицы, которые контактируют с деформированной заготовкой и возникают при максимальной силе штамповки. На пуансоне максимальное напряжение σ_n составляет 180 МПа, на матрице — 120 МПа.

По результатам моделирования спроектирован и изготовлен штамп (рис. 8, *а*) для горячей штамповки на гидравлическом прессе ДБ 2436 (рис. 8, *б*). Штамп состоит из нижней плиты *1*, в которой установлены толкатель *2* и матрица *3* с плитой *4* и направляющим кольцом *5*. Матрица *3* зафиксирована прижимным кольцом *6*. В подвижной части штампа размещены пуансонодержатель *8* с пуансоном *7*, опорная и промежуточная плиты *9* и *10*. Плита *10* с помощью четырех шпилек *11* прикреплена к верхней плите *12*. Перед штамповкой, в соответствии с расчетными данными, пуансон *7*, матрицу *3* и плиту *4* подогревали газовой горелкой до 360 °С. Исходную заготовку с нанесенной смазкой LOCTITE 8191 разогревали в печи до 430 °С и устанавливали в матрицу *3*. Экспериментальное значение силы формообразования изделия 1298 кН определяли по показаниям манометра

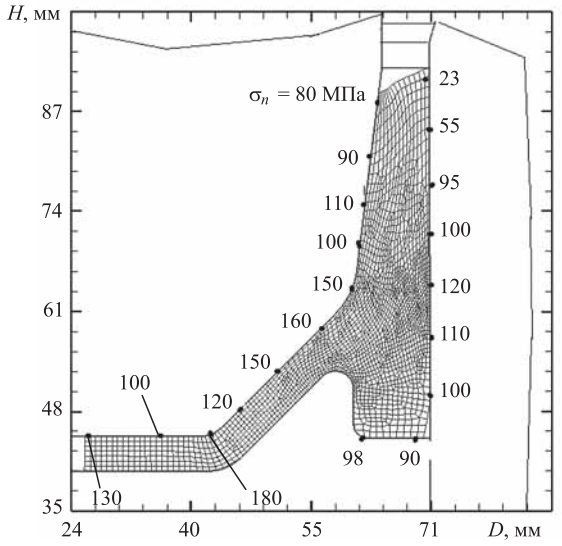
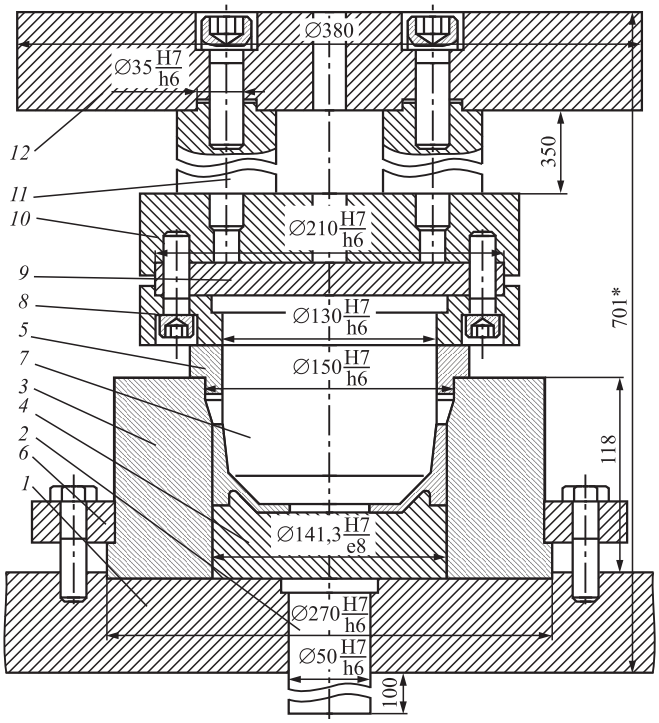


Рис. 7. Распределения нормальных напряжений σ_n на поверхностях пуансона и матрицы



а)

б)

Рис. 8. Конструкция штампа (*а*) и общий вид штампа на гидравлическом прессе ДБ 2436 (*б*)

а) *б)*

Рис. 9. Исходная заготовка (*а*) и полученное изделие (*б*)

Механические свойства деформированного металла

Номер образца	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	НВ
1	510	480	4,1	152
2		470	4,3	155
3			4,1	152
Требования по чертежу	⩾480	⩾440	⩾4	⩾125

пресса. Расхождение с расчетной величиной составило 8 %. Исходная заготовка и изделие после горячей штамповки приведены на рис. 9.

Кроме требуемой формы и размеров изделия необходимо было получить заданные механические свойства в стенке изделия. После штамповки выполнены термическая обработка изделия по режиму Т1 (закалка при температуре 470 °С и искусственное старение при 130 °С). Для проведения стандартных испытаний на растяжение из стенки изделия были вырезаны три стандартных образца (см. рис. 1). Определены условный предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и твердость (см. таблицу). В таблице также приведены данные по требованиям согласно эскизу детали. Полученные результаты соответствуют указанным требованиям.

Заключение. Методом конечных элементов проведены исследования процесса горячей объемной штамповки и определены рациональные форма и размеры исходной заготовки для формообразования изделия заданной формы полого изделия из сплава В93.

Установлены закономерности силового режима процесса, включающего силы штамповки и выталкивания изделия и удельные силы на поверхностях пуансона и матрицы. Характер изменения силовых параметров идентичный: на этапе формообразования вытяжкой наблюдается спад значений этих параметров, а в заключительной стадии — интенсивное возрастание. Силы выталкивания имеют максимум в начале хода выталкивателя и составляют приблизительно 0,03 сил деформирования.

Моделированием установлены напряженно-деформированное состояние деформируемой заготовки и распределение температуры металла в ней при штамповке. Деформированное состояние полого изделия неравномерно, $\varepsilon_i = 0{,}26$ в нижней части и в остальном объеме стенки. В донной части чашки интенсивность деформаций составляет 0,26...0,46, в верхней части стенки — 0,26, а наиболее деформированной частью с $\varepsilon_i = 0{,}45...0{,}64$ является стенка изделия. На поверхности пуансона максимальное значение нормальных напряжений 180 МПа, на матрице — 120 МПа.

Температурный интервал штамповки соблюдается на протяжении всего процесса формообразования полого изделия. Исходная температура заготовки 430 °С за время деформирования снизилась в области стенки до 370...385 °С, а в области перемычки — до 385...400 °С.

По результатам моделирования спроектирован и изготовлен штамп для горячей штамповки и проведены экспериментальные исследования на гидравлическом прессе. Механические свойства металла в стенке изделия (пределы текучести и прочности, относительное удлинение и твердость) соответствовали требованиям по чертежу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Корнеев Н.И., Аржаков В.Н., Бармашенко Б.Г.** Ковка и штамповка цветных металлов. Справочник. М.: Машиностроение, 1971. 232 с.
2. **Ковка** и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
3. **Simulation** of Cold Extrusion of Hollow Parts / V.L. Kalyuzhnyi, L.I. Alieva, D.A. Kartamyshev, I.G. Savchinskii // Metallurgist. 2017. Vol. 61. Iss. 5—6, Sept. P. 359—365. DOI: 10.1007/s11015-017-0501-1.
4. **Данченко В.Н., Миленин А.А., Кузьменко В.И.** Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. Днепропетровск: Системные технологии, 2008. 448 с.
5. **Снитко С.А., Калюжный В.Л.** Конечно-элементное моделирование многопереходного формоизменения при производстве железнодорожных колес // Вестник НТУУ "КПИ". Машиностроение. 2011. № 11. С. 106—112.
6. **Zhbankov I.G., Perig A.V., Aliieva L.I.** New schemes of forging plates, shafts and discs // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 82. P. 287—301. Access: DOI: 10.1007/s00170-015-7377-7.
7. **Zhbankov I.G., Perig A.V., Aliieva L.I.** Calculation of recovery plasticity in multistage hot forging under isothermal conditions // Springer Plus. 2016. 5:1881. DOI: 10.1186/s40064-016-3570-x.
8. **Aliev I., Zhbankov Y., Martynov S.** Forging of shafts, discs and rings from blanks with inhomogeneous temperature field // Journal of chemical technology and metallurgy. 2015. Vol. 51. Iss. 4. P. 393—400.
9. **Markov O.E.** Forging of Large Pieces by Tapered Faces. Steel in Translation. 2012. 42 (12). P. 808—810. http://dx.doi.org/10.3103/S0967091212120054.

Владимир Леонидович Калюжный, д-р техн. наук, kwl_2011@ukr.net;
Лейла Играмотдиновна Алиева, д-р техн. наук;
Играмотдин Серажутдинович Алиев, д-р техн. наук;
Вадим Николаевич Горностай, канд. техн. наук

УДК 621.778.1.06

М.И. Поксеваткин, Е.М. Басова, Д.М. Поксеваткин
(Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)

Моделирование и оптимизация процесса формообразования сортового профиля в закрытых роликовых калибрах

Разработана иерархическая гибридная модель формообразования сортового профиля в предчистовых закрытых калибрах роликовых волок на основе повышения эффективности процесса в результате удаления избыточного металла в компенсационные устройства. Модель реализована технологическим алгоритмом для поиска оптимальных значений параметров процесса.

Ключевые слова: моделирование; сортовой профиль; закрытый роликовый калибр; эффективность; избыточный металл; компенсационное устройство; оптимизация; алгоритм.

Hierarchical hybrid model for forming of profiled profile in pre-closed closed calibers of roller fibers is developed on the basis of increasing of the efficiency of the process as result of the removal of excess metal in compensation devices. The model is implemented by optimization algorithm to find the optimal values of parameters for the process.

Keywords: modeling; profiled profile; closed roller caliber; efficiency; excess metal; compensation device; optimization; algorithm.

Все более широкое применение находят перспективная технология формирования полуфабриката в предчистовых роликовых калибрах и получение окончательных формы и размеров сортового профиля в монолитной волоке. Однако неизбежность появления заусенцев на поверхности полуфабриката в результате затекания металла в зазоры между контактными поверхностями смежных роликов обусловливает повышенные износ роликов и расход металла, ухудшение качества продукции [1, 2].

В работе [3] в качестве примера предложена технология предчистового формирования полуфабриката в закрытых трехроликовых калибрах с компенсацией избыточного металла в специальные компенсационные полости (КП), выполненные между контактными поверхностями смежных роликов. Образующиеся на поверхности полуфабриката технологические валики (ТВ) (рис. 1, *а*) деформируют в следующем проходе, в том числе в монолитной волоке при получении окончательных формы и размеров сортового профиля (рис. 1, *б*).

Формирование ТВ исключает образование заусенцев, закатов и других дефектов, уменьшает силу формообразования профиля и предотвращает перегрузку калибра, снижая упругую деформацию и износ стенок калибра.

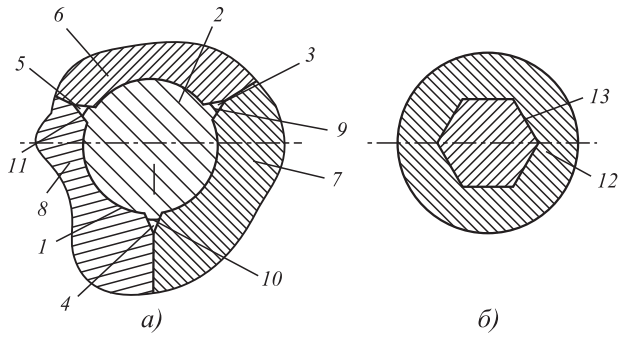


Рис. 1. Схемы формообразования сортового профиля в закрытых калибрах с компенсационными устройствами: предчистовой трехроликовый закрытый калибр с компенсационными устройствами (*а*) и монолитная волока (*б*):

1 — трехроликовый калибр; *2* — полуфабрикат; *3—5* — компенсационные полости; *6—8* — ролики; *9—11* — технологические валики; *12* — монолитная волока; *13* — готовый сортовой профиль

Формирование ТВ способствует также глубокой проработке структуры поверхностных слоев металла полуфабриката и удержанию технологической смазки на поверхности деформируемого профиля, создавая условия для гидродинамического режима смазки.

Наличие компенсационных полостей в закрытых роликовых калибрах позволяет использовать исходные заготовки с широким диапазоном допусков на поперечные размеры.

Принципиальная схема затекания избыточного металла в компенсационную полость закрытого роликового калибра показана на рис. 2.

Суммарную площадь сечений КП в i-м проходе определяют по соотношению (см. рис. 2):

$$S_{\text{кп}i} = nb_ih_i/2, \quad (1)$$

где $i = 1$ — номер прохода; m — номер прохода в монолитной волоке; n — число КП; b_i — ширина основания КП; h_i — высота КП в i-м проходе.

Принимая форму сечения ТВ, близкой к форме трапеции ($ADEC$), и пренебрегая радиусом r у основания КП, рассчитывают суммарную площадь сечения ТВ в i-м проходе:

$$S_{\text{тв}i} = q_iS_{\text{кп}i} = \frac{n\left(b_i + b_{1i}\right)h_{1i}}{2}, \quad (2)$$

где q_i — варьируемый в диапазоне $q_i \in [0{,}60; 0{,}75]$ коэффициент заполняемости КП в i-м проходе [4]; b_i, b_{1i} — соответственно ширина основания КП (ТВ) и верхнего основания ТВ, мм^2; h_{1i} — высота ТВ в i-м проходе, мм.

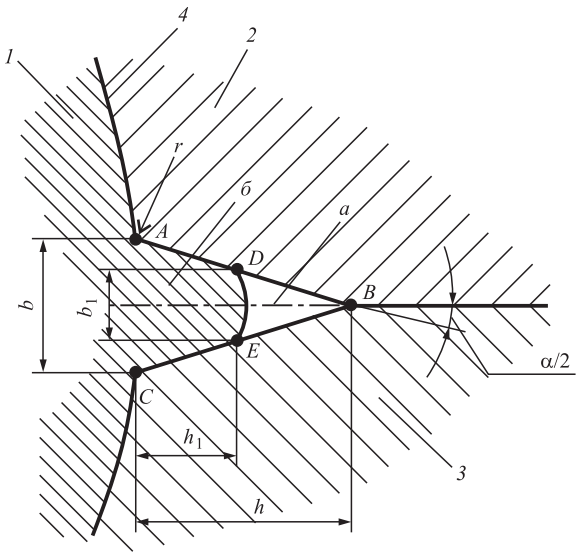


Рис. 2. Схема затекания металла в компенсационную полость закрытого роликового калибра:

1 — полуфабрикат; *2*, *3* — ролики; *4* — калибр; *а* — компенсационная полость; *б* — технологический валик

Компенсационные устройства (см. рис. 1 и 2) должны обеспечить четкое заполнение полости закрытого калибра и своевременно принять избыточный металл [4].

Условие заполнения закрытого калибра:

$$\sigma_{\text{КП}} > \sigma_{\text{з.к}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{КП}}$ — сопротивление деформации при затекании металла в КП при формообразовании профиля, МПа; $\sigma_{\text{з.к}}$ — сопротивление деформации металла при заполнении закрытого калибра, МПа.

При проектировании иерархической гибридной модели управления процедурой взаимодействия процессов формирования сортового профиля и удаления избыточного металла в компенсационные полости вначале для конкретной марки стали и выбранной температуре нагрева заготовки устанавливают допустимую по ресурсу пластичности степень деформации при температуре волочения $\varepsilon_{\text{д}}$ и определяют площадь сечения исходной заготовки, используя соотношение:

$$\varepsilon = \frac{S_{\text{з}} - S_{\text{с}}}{S_{\text{з}}} \leqslant \varepsilon_{\text{д}}, \quad (4)$$

где ε — суммарная степень деформации металла при формообразовании профиля; $S_{\text{з}}$, $S_{\text{с}}$ — площадь сечения исходной заготовки и сортового профиля соответственно, мм^2,

тогда

$$S_{\text{з}} = S_{\text{с}}/(1 - \varepsilon_{\text{д}}). \quad (5)$$

Площадь сечения исходной заготовки:

$$S_{\text{з}} = S_{\text{к1}} + S_{\text{о}j} + S_{\text{т1}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{к1}}$ — площадь сечения первого калибра волоки, мм^2; $S_{\text{о}j}$ — максимальное положительное отклонение поперечного размера исходного проката j-й точности, мм^2; $S_{\text{т1}}$ — площадь сечения технологического объема металла, учитывающего угар металла заготовки, износ стенок калибра (роликов) и упругую деформацию системы клеть—калибр в первом проходе, мм^2, посредством коэффициента $K_{\text{т1}}$:

$$S_{\text{т1}} = K_{\text{т1}}S_{\text{к1}}. \quad (7)$$

С учетом $K_{т1}$ формула (6) принимает вид:

$$S_з = S_{оj} + S_{к1}(1 + K_{т1}). \quad (8)$$

Максимальное положительное отклонение сечения объема $S_о$ исходной заготовки от ее номинального значения служит основой для расчета геометрических параметров компенсационных полостей в первом проходе с учетом возможного удаления в нее части объема металла, предусмотренного параметром $S_{т1}$; поэтому можно записать:

$$qS_{КП1} \geqslant S_{оj}, \quad (9)$$

где $S_{КП1}$ — площадь сечения КП 1-го калибра, мм^2; выполнение условия (9) обеспечивают резервом заполняемости КП, предусмотренным коэффициентом q.

Площадь сечения металла, поступающего в i-й калибр:

$$S_i = S_{к1} + qS_{кпi} + S_{тi}. \quad (10)$$

Суммарную вытяжку металла определяют по формуле

$$\lambda = S_{к1}/S_с. \quad (11)$$

Полученное значение λ разбивают на вытяжки по проходам соответственно дробному упрочнению металла, используя, например, методику расчета интенсивности упрочнения металла в зависимости от термомеханических факторов процесса, приведенную в работе [5]:

$$\lambda = \lambda_1, ..., \lambda_i, ..., \lambda_m, \quad (12)$$

где i — номер прохода; m — число проходов, включая чистовой проход в монолитной волоке.

Вытяжка в любом проходе:

$$\lambda_i = S_i/S_{i+1}. \quad (13)$$

В общем случае площадь сечения смещаемого в продольном направлении объема металла (площадь сечения объема вытяжки металла) в i-м проходе определяют по выражению

$$S_{п.сi} = S_i - S_{i+1} = \frac{\lambda_i - 1}{\lambda_i} S_i, \quad (14)$$

а площадь сечения радиально смещаемого объема металла [6]:

$$S_{р.сi} = S_{ТВi} + S_{тi}. \quad (15)$$

Для выполнения логического условия (3) сопротивление деформации при затекании металла в компенсационную полость при формообразовании профиля можно найти с использованием известной зависимости напряжения течения металла при заполнении конической полости ребра строительной панели. Применительно к рассматриваемому случаю деформирования металла получено соотношение:

$$\sigma_{КП} = 1{,}15\sigma_{вt}\left[1 + \ln\frac{b}{b_1}\Big/\left(2\,\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2}\right)\right], \quad (16)$$

где $\sigma_{вt}$ — предел прочности металла при температуре деформирования, МПа; α — угол конусности КП.

Для определения соотношения b/b_1 (см. рис. 2) проведены следующие преобразования.

Из подобия треугольников ABC и DBE (см. рис. 2) имеем:

$$b/b_1 = h(h - h_1); \quad (17)$$

из соотношений (1) и (2) следует:

$$h_1\frac{b + b_1}{2} = q\frac{bh}{2}.$$
$$b/b_1 = (h - h_1)/(1 - q). \quad (18)$$

Из выражений (17) и (18) получено:

$$b/b_1 = 1\Big/\left(\sqrt{1 - q}\right). \quad (19)$$

С учетом равенства (19) зависимость (16) приобретает вид, удобный для оценки важного параметра КП, влияющего на ее заполняемость, — угла конусности α.

В частном случае, при максимальном значении коэффициента заполняемости КП ($q_p \leqslant 0{,}75$), что технологически оправдано, например, при использовании исходного проката обычного качества, $b_1 = 0{,}5b$, и расчет $\sigma_{КП}$ по формуле (16) существенно упрощается.

С использованием формулы (16) при волочении стали 45 при температуре 1100 °С ($\sigma_{вt}$ = 35 МПа) получены значения $\sigma_{КП}$, равные соответственно 78,49 МПа (α = 40°); 85,73 МПа (34°); 95,79 МПа (28°) и 111,90 МПа (22°), и построен график $\sigma_{КП} = f(\alpha)$ (рис. 3).

Полученная зависимость $\sigma_{КП} = f(\alpha)$ хорошо согласуется с результатами исследований

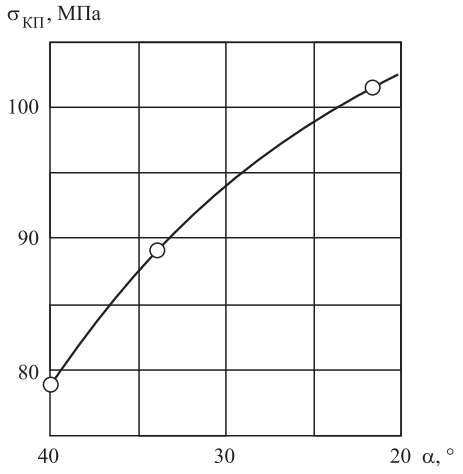


Рис. 3. Зависимость сопротивления деформации $\sigma_{КП}$ металла при затекании в КП от угла конусности α полости

работы "Теория обработки давлением" (Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. и др. М.: Металлургиздат, 1963. 672 с.) при выдавливании металла в коническую полость облойной канавки открытого штампа.

Сопротивление деформации $\sigma_{з.к}$ в полости калибра в общем виде описывается зависимостью:

$$\sigma_{з.к} = f(\sigma_{вt}, \nu, \varepsilon, \xi, \mu), \qquad (20)$$

где ν — форма очага деформации; ε_i, ξ_i — степень и скорость деформации в *i*-м калибре соответственно; μ — показатель трения.

Для практических расчетов значение $\sigma_{з.к}$ может быть найдено из соотношения [7]:

$$\sigma_{з.к} = K\sigma_{вt}\ln\lambda, \qquad (21)$$

где *K* — коэффициент, учитывающий работу сил трения и форму очага деформации; принимают *K* = 1,3...1,4.

Полученные по формулам (16) и (21) значения напряжений должны удовлетворять условию (3).

Для обеспечения высотной устойчивости ТВ при обжатии полуфабриката во втором и последующих проходах использовано соотношение, принятое при шаговой протяжке полосы [6]. Применительно к высотной деформации ТВ можно записать:

$$\eta_i = \left(\frac{b + b_1}{2h_1}\right) \geqslant \eta_m, \qquad (22)$$

где η_i — варьируемый по условию (22) показатель высотной устойчивости ТВ в *i*-м проходе; η_m — допустимое значение показателя высотной устойчивости ТВ. В работе [5] при осадке цилиндрических и прямоугольных тел рекомендовано гарантированное значение $\eta_m \geqslant 0{,}75$.

Логические условия (3) и (22) отражают сложную систему взаимодействия процессов заполнения закрытого калибра и компенсационных полостей, описываемую большим числом взаимосвязанных параметров. Поэтому для установления независимого варьируемого параметра при оптимизации модели использовали вывод: на сопротивление деформации при затекании металла в коническую полость решающее влияние оказывает угол конусности этой полости (см. кн.: Соколов Н.Л. Горячая штамповка деталей. М.: Машиностроение, 1967. 191 с.). Тогда формула (16) с учетом выражения (19) может быть представлена в виде:

$$\sigma_{КП} = 1{,}15\sigma_{вt}\left[1 + \frac{1}{2\,\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2}}\ln\left(\frac{1}{\sqrt{1-q}}\right)\right], \qquad (23)$$

а логическое условие (22) обеспечения высотной устойчивости ТВ при обжатии их во втором и последующих проходах с учетом выражения (19) преобразуется в уравнение:

$$\eta = q\,\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2}\Big/\left[\left(1-\sqrt{1-q}\right)^2\right] \geqslant \eta_m. \qquad (24)$$

При этом для параметров *q* и α устанавливают допустимые области: $q_р \in [0{,}50;\ 0{,}75]$ [4] и $\alpha_р \in [28°;\ 40°]$.

При *q* = 0,75 уравнение (24) приобретает вид:

$$\eta = 3\,\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2} \geqslant \eta_m. \qquad (25)$$

При минимальном значении α_{min} = 28° показатель η = 0,75, что соответствует значению η, минимально допустимому по высотной устойчивости ТВ (условие (22)), а при α = 40° величина $\sigma_{КП}$ резко уменьшается и условие (3) становится трудновыполнимым.

Иерархическая гибридная модель управления оптимизацией технологических параметров формообразования сортового профиля в закрытых роликовых калибрах реализована четырехмодульным алгоритмом, представленным на рис. 4. Алгоритм состоит из двух подсистем: основная подсистема для определения

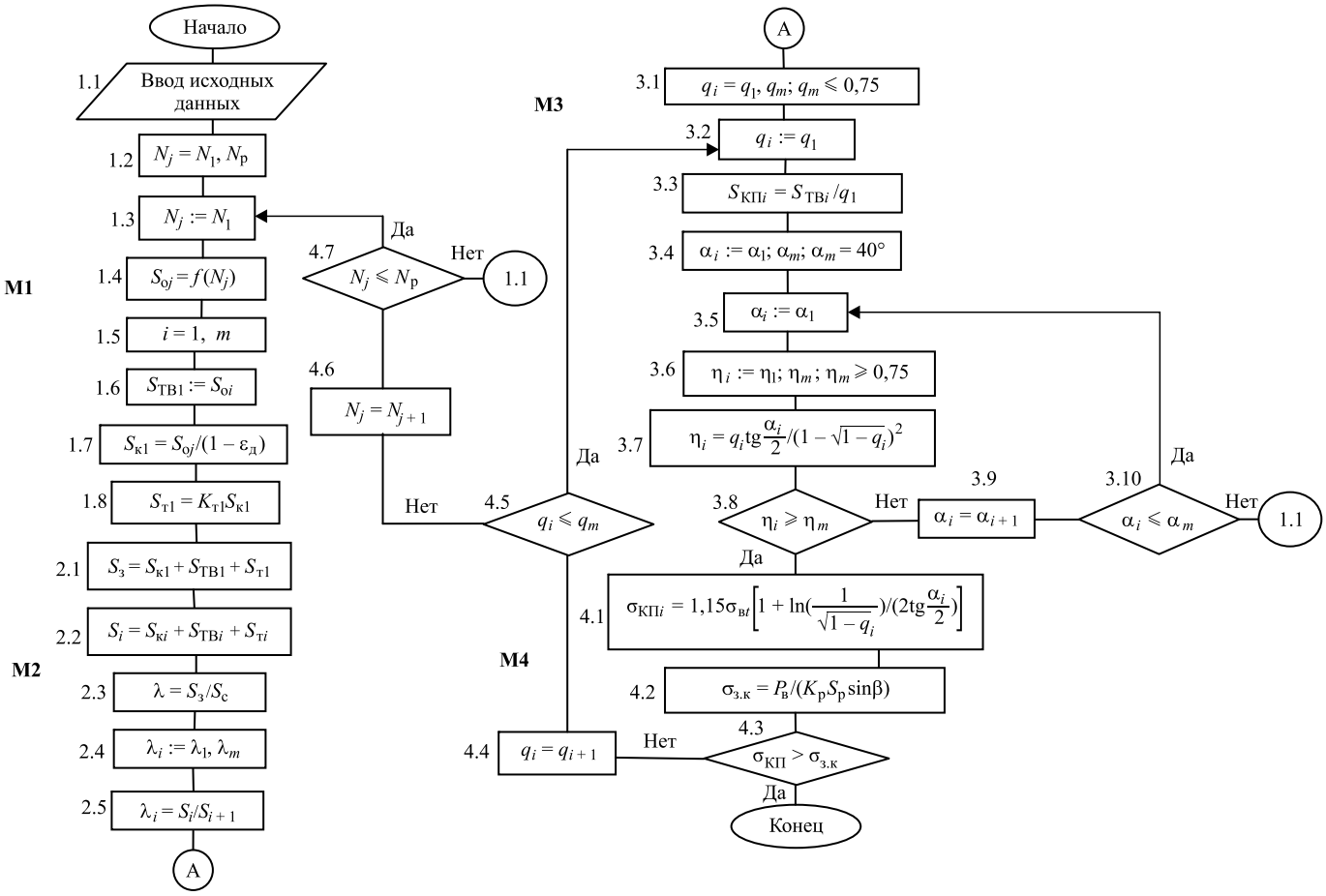


Рис. 4. Технологический алгоритм оптимизации параметров формирования сортового профиля

и оптимизации ключевых параметров формирования сортового профиля и подсистема, обеспечивающая функционирование основной подсистемы в установленных областях допустимых значений варьируемых параметров. В частности, модуль М1 — информационный; М2 — определяет ключевые параметры по проходам; М3 — обеспечивает условие высотной устойчивости ТВ; М4 — обеспечивает условие заполняемости закрытого калибра.

В блоке 1.1 модуля М1 вводят исходные данные: S_c; марка стали; T, °С; $\sigma_{вi}$; $\varepsilon_д$; ξ; $\lambda = f(\varepsilon_д)$; перечень исходного проката N_j; K_p; q_p; η_m; α_p. В блоках 1.2 и 1.3 задают перечень (N_j; $j = 1,\ p$) и номер проката, начиная с проката обычной точности ($j = 1$) по ГОСТ 2590. В блоке 1.4 определяют площадь сечения S_{oj} как разность площадей сечений объемов металла, используя величину исходного проката j-точности. Далее в блоках 1.5 и 1.6 задают номер прохода и определяют площадь сечения ТВ. В блоках 1.7 и 1.8 рассчитывают площади сечений калибра первого прохода и площадь сечения технологического объема металла, учитывающего угар металла заготовки; износ стенок калибра (роликов) и упругую деформацию системы клеть—калибр в первом проходе посредством коэффициента $K_{т1}$.

В блоках 2.1 и 2.2 модуля М2 определяют площади сечений исходной заготовки и металла, поступающего в i-й калибр. В блоках 2.3, 2.4 определяют суммарную вытяжку, вытяжку первого прохода и монолитной волоки, а в блоке 2.5 рассчитывают вытяжку в любом проходе.

В модуле М3 обеспечивают заполняемость закрытого калибра. В блоках 3.1 и 3.2 задают диапазон варьируемого коэффициента заполняемости КП и его значение в первом проходе, а в блоке 3.3 рассчитывают площади сечения КП в i-м проходе. В блоках 3.4 и 3.5 задают варьируемое значение угла конусности КП и его значение для первого прохода. В блоках 3.6 и 3.7 задают варьируемый показатель высот-

ной устойчивости ТВ в i-м проходе и рассчитывают его значение в i-м проходе (24). Затем переходят в блок 3.8, где проверяют условие $\eta_i \geqslant \eta_m$. Если данное условие не выполняется, то переходят в блок 3.9, где подбирают угол конусности КП для последующего прохода, и переходят в блок 3.10, где проверяют выполнение условия ($\alpha_i \leqslant \alpha_m$). Если условие выполняется, то возвращаются в блок 3.5, где задается угол конусности КП для последующего прохода. Если условие блока 3.8 выполняется, то переходят к модулю М4.

В блоках 4.1 и 4.2 рассчитывают сопротивление деформации при затекании металла в КП и в полость закрытого калибра. В блоке 4.3 проверяют выполнение условия $\sigma_{КП} > \sigma_{з.к}$. Если условие не выполняется, то в блоках 4.4 и 4.5 проводят корректировку коэффициента заполняемости и пересчет значения $\sigma_{КП}$, начиная с блока 3.2 до выполнения условия блока 4.3. Если условие блока 4.5 не выполняется, то в блоках 4.6 и 4.7 подбирают исходный прокат повышенной точности и осуществляют пересчет $\sigma_{КП}$, начиная с блока 1.3. Если после пересчета условие 4.3 не выполняется, то в блоке 1.1 корректируют ввод исходных данных.

Заключение. Разработана иерархическая гибридная модель управления процессами заполнения закрытого роликового калибра и компенсационной полости для повышения эффективности формообразования сортового профиля.

Сформулированы логические условия процесса формирования профиля, обеспечивающие заполняемость закрытого роликового калибра и высотную устойчивость технологических валиков при их обжатии.

Ключевым варьируемым параметром процесса, позволяющим обеспечить выполнение логических условий формирования профиля, является угол конусности компенсационной полости.

Модель реализована четырехмодульным оптимизационным алгоритмом, который успешно опробован. Алгоритм может быть основой для автоматизации проектирования технологического процесса формирование конкретного сортового профиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2235614 РФ.** Способ получения калиброванного шестигранного профиля / В.С. Славин, С.И. Платов, В.П. Анцупов и др. Опубл. 10.09.2004.
2. **Славин В.С., Смушкевич Л.Е., Норец А.И.** Эффективные технологии производства фасонных профилей высокой точности. URL://http://www.rusnauka.com/4_SND_2013/Tecnic/1_127375.doc.htm (дата обращения 12.02.2018).
3. **Пат. 2582839 РФ.** Способ формирования сортового профиля в закрытых калибрах / М.И. Поксеваткин, Е.М. Басова, С.В. Герман. Опубл. 27.04.2016, Бюл. № 12.
4. **Классификация** и выбор компенсационных устройств в штампах объемной штамповки / М.И. Поксеваткин, Г.П. Терерин, Д.М. Поксеваткин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 1994. № 6. С. 17—19.
5. **Ковка** и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение. 2010. 717 с.
6. **Повышение** эффективности процесса формирования сортовых профилей в предчистовых роликовых волоках / М.И. Поксеваткин, Е.М. Басова, С.В. Герман, Е.А. Иванайская, А.А. Иванайский // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 7. С. 314—318.
7. **Рудской А.И., Лунев В.А., Шабалло О.П.** Волочение: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 126 с.

Михаил Иванович Поксеваткин, канд. техн. наук,
mtio2014@list.ru;
Елена Михайловна Басова;
Дмитрий Михайлович Поксеваткин, канд. техн. наук

УДК 621.771.8

А.В. Шапарев, И.А. Савин
(Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ)

Влияние состояния контактных поверхностей на формирование соединения стали и латуни при холодном плакировании

Исследовано влияние микрогеометрии и поверхностного упрочнения контактных поверхностей слоев биметалла, температуры диффузионного отжига после плакирования, соотношения толщин слоев биметалла на прочность их соединения после плакирования. Разработаны технологические рекомендации для производства биметалла 1 по ОСТ 3-6648—91 латунь Л90—сталь 18ЮА—латунь Л90 способом холодного плакирования.

Ключевые слова: соединение металлов; биметалл; холодное плакирование; контактные поверхности; степень деформации.

The effect of microgeometry and surface hardening of the contact surfaces of bimetal layers, diffusion annealing temperature after cladding and the bimetal layers thickness ratio on the strength of their bonding after cladding is studied. Technological recommendations for the production of bimetal 1 on OST 3-6648—91 brass L90—steel 18YuA—brass L90 by the cold cladding method are developed.

Keywords: bonding of metals; bimetal; cold cladding; contact surfaces; degree of deformation.

Введение. Из анализа литературных данных следует, что подготовка контактных поверхностей перед холодным плакированием является одной из важнейших технологических операций. В связи с этим для совершенствования технологии холодного плакирования биметаллических полос латунь—сталь—латунь целесообразно определить оптимальную шероховатость контактных поверхностей, размеры образующихся точек сцепления, исследовать влияние наклепа и толщины упрочненного слоя на степень деформации схватывания, изменение межслойной шероховатости в процессе плакирования биметаллических полос.

Холодное плакирование чаще всего осуществляют на прокатных станах кварто [1].

Поэтому актуальна разработка технологической схемы производства биметалла 1 по ОСТ 3-6648—91 толщиной 3,2 мм, которая позволит:

1) исключить операции промежуточного отжига и окончательной холодной прокатки без ухудшения требуемых свойств и точности готовых биметаллических полос;

2) снизить исходную толщину стальной полосы до приемлемых размеров для обеспечения ее прохождения по основным технологическим агрегатам существующих цехов биметалла.

В работе [1] рекомендовано значение относительного обжатия при холодном плакировании биметаллических полос латунь—сталь—латунь не менее 0,55, в работах [2—4] — 0,45...0,55, при этом меньшее значение относится к биметаллическим полосам шириной не более 100 мм. На требуемую деформацию схватывания при плакировании оказывают влияние соотношение толщин слоев [2], давление в очаге деформации [1], подготовка поверхностей [2, 5] и ряд других технологических факторов.

Кроме высокой прочности сцепления слоев к биметаллическим полосам латунь—сталь—латунь предъявляются требования по точности размеров, механическим свойствам и микроструктуре [6]. Относительное обжатие при плакировании влияет на прочность сцепления слоев биметалла, характер микроструктуры, размер рекристаллизованных зерен, механические свойства полосы, точность размеров [2]. Для создания необходимых вытяжных свойств биметаллических полос оптимальная степень деформации составляет 0,45...0,60. Большие значения совместной степени деформации приводят к чрезмерному измельчению зерен после процесса рекристаллизации и увеличению анизотропии механических свойств

материала, а меньшие значения способствуют чрезмерному росту зерна феррита при отжиге и ухудшению поверхности после штамповки [1].

В промышленных условиях способ холодного плакирования освоен для получения биметаллических полос латунь Л90—сталь 11кп—латунь Л90 (биметалл 3 по ОСТ 3-6649—91) толщиной 0,90 мм при использовании технологической схемы с высокотемпературным диффузионным отжигом [2]. Биметаллические полосы латунь Л90—сталь 18ЮА—латунь Л90 толщиной 2,0...3,2 мм (биметалл 1 по ОСТ 3-6648—91) производят способом горячей прокатки пакетов.

Технологическая схема получения биметалла 1 толщиной 2,9 и 3,2 мм способом холодного плакирования с использованием высокотемпературного диффузионного отжига неприемлема для освоения в производственных условиях, так как для этого требуется стальная заготовка толщиной не менее 8,5 и 9,5 мм соответственно, для обработки которой требуется уникальное прокатное оборудование большой мощности. Производство биметалла 1 с применением низкотемпературного диффузионного отжига требует использования стальной заготовки толщиной 7,0 мм, что затруднено из-за недостаточной мощности некоторых узлов механического оборудования существующих цехов биметалла (валковых систем, отгибателей переднего конца полосы, натяжных станций, гильотинных ножниц и др.) [2].

В условиях действующих цехов предпочтительно использовать стальную заготовку толщиной не более 6,2...6,5 мм [2]. Однако в этом случае известные технологические схемы для производства биметалла 1 толщиной 3,2 мм оказываются неэффективными из-за невозможности получения требуемой степени деформации схватывания слоев биметалла при холодном плакировании и полос с прочным сцеплением слоев.

Таким образом, до настоящего времени не разработана рациональная технологическая схема производства биметалла 1 по ОСТ 3-6648—91 толщиной 3,2 мм способом холодного плакирования, внедрение которой возможно в существующих цехах биметалла без реконструкции прокатного и механического оборудования.

Методика проведения исследований. Подготовка контактных поверхностей вызвана необходимостью удаления различных жировых и оксидных пленок, препятствующих образованию соединения, и создания поверхности с определенными свойствами.

Предварительную подготовку поверхности стальных и латунных образцов осуществляли путем травления в 16...20%-ном растворе серной кислоты в течение 20...25 мин, тщательной промывки в холодной проточной воде, обезжиривания техническим ацетоном и механической зачистки. Стальные образцы, подвергаемые предварительной нормализации при температуре 900 °С, не травили, а толстую оксидную пленку после обезжиривания удаляли механической зачисткой вращающимися металлическими щетками и иглофрезами конструкции ВНИИметиз (г. Магнитогорск). Диаметр щеток 300 мм; ширина 70 мм; материал ворса — сталь 50; диаметр 0,5 мм. Частота вращения щетки 550 об/мин; скорость подачи полосы 0,1 м/с.

Перед деформированием в лабораторных условиях проводили зачистку поверхности образцов иглофрезами диаметром 130 мм, шириной 40 мм, диаметром ворса 0,28 мм, материал — сталь У8А. Частоту вращения иглофрезы варьировали от 50 до 560 об/мин, скорость подачи полосы 22,4 мм/мин. Зачистку осуществляли в один проход, толщина снимаемого слоя 0,2...0,5 мм.

После зачистки измеряли шероховатость, твердость поверхностного слоя по ГОСТ 2789—73 на профилографе-профилометре А1-252 "Калибр". Параметры шероховатости: среднеарифметическое отклонение профиля Ra, число выступов n, относительная опорная длина профиля tp, максимальное отклонение профиля Rmax.

Для получения погрешности измерения не более 5 % измерение шероховатости каждого образца проводили не менее 16—20 раз. Для изучения и анализа профиля в некоторых случаях снимали профилограммы в масштабе: вертикальное увеличение 500, горизонтальное 10, 20 и 50.

Микротвердость и глубину наклепа поверхности стальных образцов измеряли следующим образом. Поверхность образцов обрабатывали в определенном направлении и затем изготовляли "косой" шлиф вдоль направле-

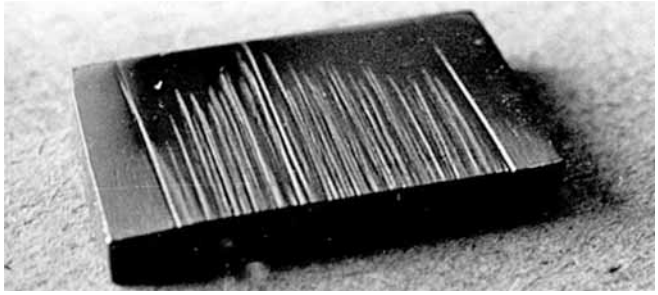


Рис. 1. Общий вид "косого" шлифа для измерения толщины наклепанного слоя при иглофрезеровании поверхности

ния обработки путем полировки пастой ГОИ с углом 3° (рис. 1).

Микротвердость Н, Н/мм^2, измеряли на приборе ПМТ-3 вдоль выступов и впадин и вычисляли по формуле [1]

$$H = [2P\sin(\alpha/2)]/d^2, \quad (1)$$

где P = 1,96 Н — нагрузка; α = 136° — угол между противоположными гранями измерительной пирамиды прибора; d — среднее арифметическое длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Схема замера микротвердости выступов и впадин поверхности приведена на рис. 2, а схема определения параметров Δh, c, l_i — на рис. 3 (где Δh — разность толщин образца до и после шлифовки; c — расстояние от первой точки замера до края образца; l_i — расстояние от i-й точки замера до края образца). При оценке

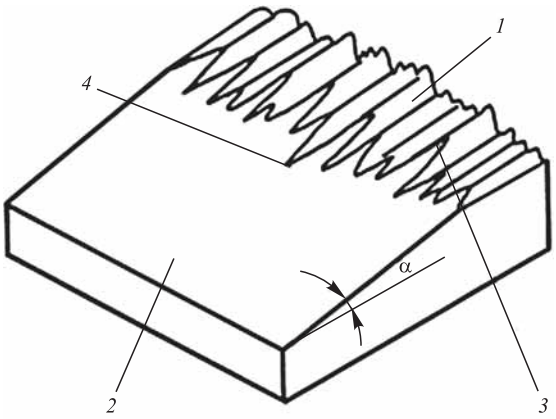


Рис. 2. Схема замера микротвердости выступов и впадин поверхности, обработанной иглофрезой:

1 — поверхность после механической обработки; *2* — шлифованная поверхность; *3*, *4* — точка замера микротвердости в микровпадинах и в микровыступах соответственно

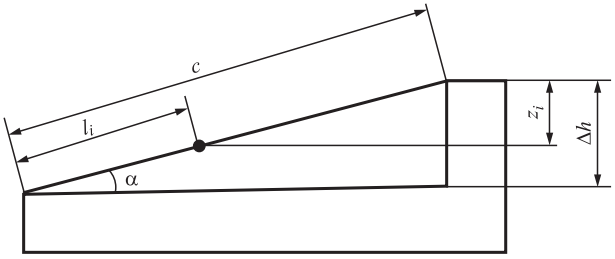


Рис. 3. Схема определения параметров Δh, c, l_i

микротвердости использовали дисперсионный анализ с оценкой средних значений [1].

С помощью инструментального микроскопа определяли параметры Δh, c, l_i и вычисляли глубину залегания точки замера:

$$z_i = [(c - l_i)/c]\Delta h. \quad (2)$$

Исследование влияния микрогеометрии поверхностей исходных стальных и латунных заготовок, степени деформации при плакировании, механической и конструкционной неоднородностей пакета на характер образования соединения и его прочность выполнено в работах [1, 7] на образцах из латуни Л90 (плакирующий слой) и стали 11кп (основной слой). Холодное плакирование проводили на четырехвалковом стане 400 кварто, при этом в качестве варьируемых параметров процесса использовали относительное обжатие пакета при плакировании с интервалом варьирования $\varepsilon_п$ = 0,40...0,80; показатель конструкционной неоднородности, т.е. соотношение толщин плакирующего и основного слоев, A = 0,05...0,25; показатель механической неоднородности, равный отношению временного сопротивления разрыву металлов основного и плакирующего слоев, B = 0,50...3,75.

Для активации энергетического состояния соединяемых поверхностей исследовали процесс холодного плакирования стали латунью с предварительным нагревом стальной основы [1].

Нагрев стальной основы осуществляли на установке высокочастотного нагрева Л32-67М в интервале температур 100...200 °С. Нагрев стали до температуры менее 100 °С не оказывает влияния на прочность соединения слоев биметалла. Нагрев свыше 200 °С с учетом дополнительного деформационного нагрева

может привести к значительному снижению пластичности латуни [1, 7].

Результаты исследований и их обсуждение. В качестве исследуемой величины использована деформация схватывания слоев ε_c, определяемая по методике, описанной в работе [2]. Для исследования зависимости $\varepsilon_c = f(T_0, H_п/H)$ (где T_0 — температура предварительной нормализации стали 18ЮА, °С; $H_п$, H — микротвердость контактной поверхности и нижележащих слоев стали соответственно, Н/мм^2) выполнен эксперимент плана $2^2//4$.

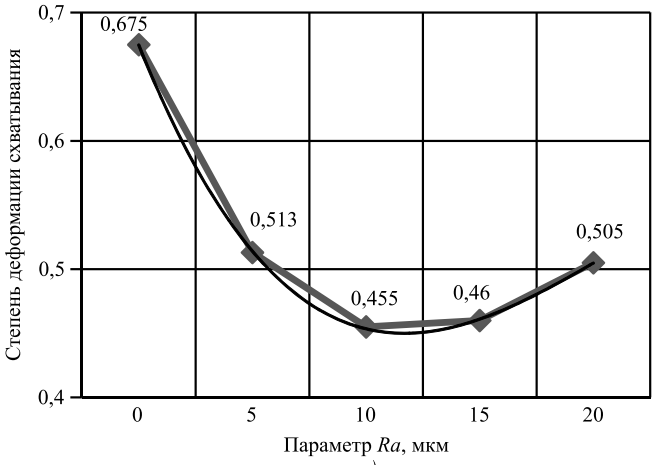
Условия опыта: биметаллические образцы из стали 18ЮА толщиной 6,0 мм и латуни Л90 толщиной 1,6 мм; отжиг после деформации при температуре 680 °С в течение 2 ч. Варьирование факторов: в диапазоне T_0 = 550...900 °С; $H_п/H$ = 2,0...4,0. Из обработки данных эксперимента получено следующее уравнение регрессии с погрешностью не более 3,5 %:

$$\varepsilon_c = 0{,}580 - 0{,}0308X_1 - 0{,}0628X_2. \qquad (3)$$

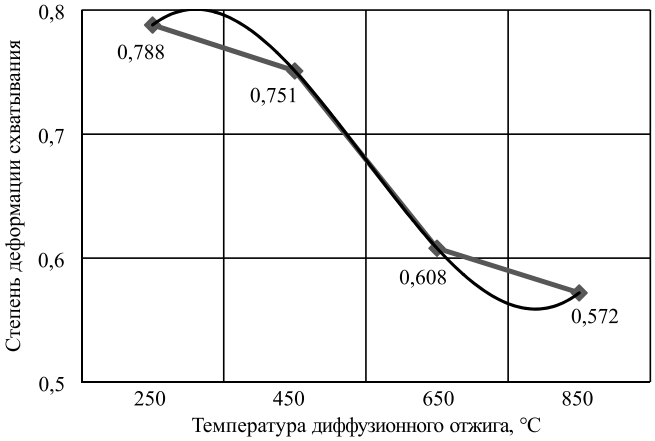
В исследованных интервалах с увеличением поверхностного упрочнения металлов и в меньшей степени при проведении предварительной нормализации стали при температуре 900 °С уменьшается деформация схватывания. Совместное влияние поверхностного упрочнения и нормализации стали в исследованных интервалах статистически незначимо.

Установлено, что с увеличением параметра шероховатости *Ra* контактных поверхностей уменьшается степень деформации, необходимая для образования соединения слоев (рис. 4, *а*).

Шероховатость поверхности латуни Л90 не оказывает влияния на образование соединения. При холодном плакировании стали 18ЮА латунью Л90 с последующим отжигом минимальная степень деформации схватывания (менее 0,50) получена при *Ra* = 8...15 мкм. Увеличение степени деформации схватывания при холодном плакировании стали 18ЮА латунью Л90 с параметром шероховатости поверхности стали более 15 мкм объясняется, по-видимому, необходимостью заполнения пор на поверхности раздела, зарастание которых диффузионным путем при последующем отжиге невозможно.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость степени деформации схватывания от параметра шероховатости *Ra* (*а*) и температуры диффузионного отжига (*б*) биметалла сталь 18ЮА—латунь Л90

При исследовании влияния температуры диффузионного отжига на степень деформации схватывания стали 18ЮА с латунью Л90 установлено, что с увеличением температуры отжига до 850 °С уменьшается степень деформации схватывания (рис. 4, *б*), что объясняется, по-видимому, интенсификацией процессов диффузии на поверхности раздела слоев при отжиге.

Как показано в работах [2, 7], отжиг при температуре более 850 °С приводит к ухудшению качества соединения из-за интенсивного протекания процессов межкристаллитной коррозии меди в сталь.

Для исследования влияния соотношения толщин латунного и стального слоев биметалла $h_м/h_т$ и содержания цинка C_{Zn} в меди на степень деформации схватывания стали 18ЮА с латунью Л90 выполнен эксперимент

плана $2^2//4$ $\varepsilon_c = f(h_м/h_т, C_{Zn})$. Интервалы варьирования фактора $h_м/h_т$ = 0,188...0,278. При варьировании фактора X_2 использованы латуни марок Л63 (27 % Zn) и Л90 (10 % Zn). В результате выполнения эксперимента получено уравнение регрессии с погрешностью не более 2,3 %:

$$\varepsilon_c = 0{,}607 + 0{,}0703h_м/h_т + 0{,}0843C_{Zn}. \quad (4)$$

Из анализа формулы (4) можно заключить, что при уменьшении соотношения толщин слоев и в меньшей степени при снижении содержания цинка в латуни уменьшается деформация схватывания стали 18ЮА с латунью при холодном плакировании и отжиге.

Установлено, что качество биметаллических материалов в значительной мере определяется свойствами переходной зоны [2]. Переходную зону биметаллических полос латунь Л90—сталь 18ЮА—латунь Л90 исследовали методом микрорентгеноспектрального анализа на приборе Camebax. Как показал анализ концентрационных кривых, толщина диффузионной зоны биметалла после отжига составляет 30...35 мкм (глубина диффузии меди в железо не превышает 20 мкм, железа в медь — 15 мкм). Новых образований с химическим составом, отличным от химического состава стали или латуни, не обнаружено. Переходная зона представляет собой четко выраженную поверхность раздела между разнородными металлами. Характер распределения исследуемых элементов в переходной зоне биметаллов, полученных способами горячей пакетной прокатки и холодного плакирования, идентичен и не имеет существенных различий. Граница раздела слоев ярко выражена и не имеет несплошностей и неметаллических включений.

Исследование влияния температуры нагрева стальной заготовки на прочность соединения слоев показало, что при нагреве до 150...200 °С прочность соединения слоев возрастает на 30...50 % [1, 7]. Это объясняется тем, что в результате нагрева возрастает энергетическое состояние контактной поверхности, облегчающее схватывание слоев, кроме того, улучшаются условия сохранения и развития металлических связей между слоями вследствие снижения уровня межслойных напряжений, интенсификации протекания релаксационных и диффузионных процессов.

Степень обжатия при плакировании, обеспечивающая надежное соединение стали и латуни, снижается до 45...50 % [1]. Подогрев стальной составляющей биметалла до 150...200 °С сохраняет в стали холоднодеформированную структуру, что дает возможность осуществлять окончательную холодную прокатку биметалла с любой степенью деформации выше критической. Это позволяет производить холодным плакированием трехслойный биметалл толщиной 2,8...3,2 мм из стальной заготовки толщиной 6...7 мм.

Заключение. Выполнена оценка условий образования прочного соединения слоев биметалла при совместной пластической деформации в холодном состоянии.

Подготовка контактных поверхностей путем обеспечения требуемой шероховатости, необходимого поверхностного упрочнения, предварительного нагрева стального слоя биметалла до 150...200 °С позволяет проводить окончательную холодную прокатку биметалла без применения промежуточного отжига, что существенно сократило технологический цикл производства. Подогрев стальной составляющей до 150...200 °С сохраняет в стали холоднодеформированную структуру, что дает возможность осуществлять окончательную холодную прокатку биметалла с любой степенью деформации. Это позволяет производить холодным плакированием трехслойный биметалл толщиной 2,8...3,2 мм из стальной заготовки толщиной 6...7 мм без модернизации существующего прокатного оборудования.

Результаты исследования нашли применение при разработке новых технологических процессов производства биметаллических полос [2, 3, 8], литейных пресс-форм [9—14] и режущего инструмента [15, 16] способом холодного плакирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кобелев А.Г., Троицкий О.Ю.** Совершенствование технологии производства холоднокатаных биметаллов // Металлург. 1997. № 5. С. 31—35.

2. **Шапарев А.В., Савин И.А.** Совершенствование технологии производства биметаллических лент. Курск: Университетская книга, 2015. 214 с.

3. **Шапарев А.В., Савин И.А.** Расчет совместной пластической деформации, необходимой для обра-

зования соединения металлов в холодном состоянии // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 10. С. 32—36.

4. **Шапарев А.В., Савин И.А.** Расчет деформации, необходимой для образования соединения слоев при совместной холодной прокатке стали 18ЮА и латуни Л90 // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 5. С. 220—225.

5. **Блинов В.С., Кадошников В.И.** Особенности плакирования и холодной прокатки биметаллических полос // Процессы и оборудование металлургического производства. Магнитогорск, 2000. С. 91—92.

6. **Шапарев А.В., Савин И.А.** Повышение точности биметаллических лент при холодном плакировании и дрессировке // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 9. С. 409—413.

7. **Материаловедение.** Технология композиционных материалов / А.Г. Кобелев, М.А. Шаронов, О.А. Кобелев и др. М.: КНОРУС, 2016. 270 с.

8. **Shaparev A., Savin I.** Calculation of the amount of the reduction required for the formation of compound layers during cold rolling of bimetals//Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 328—333. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.328.

9. **Гавариев Р.В., Савин И.А., Леушин И.О.** Влияние функциональных покрытий на эксплуатационную стойкость пресс-форм литья под давлением для цинковых сплавов // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 66—70. DOI: 10.17580/tsm.2016.01.11.

10. **Гавариев Р.В., Савин И.А., Леушин И.О.** Оптимизация теплового баланса пресс-форм при литье под давлением Zn-сплавов под давлением Zn-сплавов // Литейное производство. 2014. № 7. С. 26—29.

11. **Савин И.А., Гавариев Р.В.** Особенности проектирования технологической оснастки для получения отливок сплавов цветных металлов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2012. № 4—2. С. 41—43.

12. **Теоретическая** оценка трещиностойкости оболочковых форм точного литья, изготовленных с применением технологии низкотемпературного прокаливания / И.А. Савин, И.О. Леушин, В.А. Ульянов, Л.И. Леушина // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2015. № 9 (222). С. 3—5.

13. **Могилевец В.Д., Савин И.А.** Микроэлементное нормирование как метод повышения эффективности производства // Компетентность. 2015. № 5 (126). С. 49—55.

14. **Савин И.А., Марков В.В., Нищенков А.В.** Методика теоретического расчета поверхностного натяжения металлических расплавов на основе физической модели энергетического состояния жидкости // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2014. № 5. С. 48—52.

15. **Емельянов Д.В., Савин И.А.** Проектирование и производство спиральных сверл переменной жесткости. Курск: Университетская книга, 2016. 231 с.

16. **Савин И.А.** Формирование базы данных вариантов материала режущей части инструмента и метода его поверхностного упрочнения // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3. С. 97—105.

Александр Васильевич Шапарев, канд. техн. наук,
meganeiii@yandex.ru;
Игорь Алексеевич Савин, канд. техн. наук

УДК 621.762

С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко, В.С. Гарипов
(Оренбургский государственный университет)

Термодиффузионное насыщение твердых сплавов группы ВК

Проведены опыты по термодиффузионному насыщению поверхности образцов режущего инструмента из твердого сплава ВК8 компонентами: буферное вещество — Al_2O_3, активатор — NH_4Cl, насыщающие элементы: желтая кровяная соль $K_4(Fe(CN)_6)$, бура B_4C, медь Cu. После отжига и химико-термической обработки (ХТО) получены структуры поверхностного слоя образцов, выполнен анализ физико-механических свойств твердого сплава ВК8 (твердость увеличилась незначительно, поэтому проведение отжига до ХТО нецелесообразно). Определены эффективные режимы и составы для ХТО и их влияние на физико-механические свойства твердого сплава ВК8, а также стойкость образцов при истирании на алмазно-абразивном диске. Проведены испытания точением после различных видов ХТО.

Ключевые слова: твердосплавные неперетачиваемые пластины из сплава ВК8; термодиффузионное насыщение; отжиг; износ при резании; износ при истирании.

Experiments on the thermodiffusion saturation of the surface of the cutting tool samples from the hard alloy VK8 by components: buffer substance — Al_2O_3, activator — NH_4Cl, saturated elements: yellow blood salt $K_4(Fe\ (CN)_6)$, borax B_4C, copper Cu are performed. After annealing and thermochemical treatment (TCT) the structures of the surface layer of samples are obtained and analysis of the physical and mechanical properties of the hard alloy VK8 (hardness increased slightly, in this regard, the annealing to TCT is impractical). The effective regimes and compositions for TCT and their influence on the physical and mechanical properties of the hard alloy VK8 and the resistance of samples at abrasion on the diamond-abrasive disc are determined. Turning tests after various types of TCT are performed.

Keywords: solid carbide profile plates from alloy VK8; thermodiffusion saturation; annealing; cutting wear; attrition wear.

Характерными признаками, определяющими режущие свойства твердых сплавов, являются высокая твердость, износостойкость и красностойкость до температуры 1000 °С. Однако эти сплавы обладают меньшей вязкостью и теплопроводностью, чем быстрорежущая сталь, что следует учитывать при их эксплуатации.

Вольфрамовые сплавы (ВК) по сравнению с титановольфрамовыми (ТК) обладают при резании меньшей температурой свариваемости со сталью, поэтому их применяют преимущественно для обработки нержавеющих сталей и чугуна, цветных металлов и неметаллических материалов. Увеличение стойкости и надежности твердосплавного режущего инструмента во многом могло бы способствовать повышению производительности труда и снижению потребности в этом дорогостоящем инструменте. Стойкость качественно изготовленного инструмента может быть значительно увеличена дополнительной химико-термической обработкой (ХТО) его поверхностного слоя и изменением структуры [1—8].

ТУ 48-19-99—73 "Твердые сплавы" регламентированы следующие свойства твердых сплавов: плотность, средний предел прочности при изгибе, твердость HRA и коэффициент стойкости при резании.

Из всех перечисленных характеристик на изделиях можно определить твердость по Роквеллу (Виккерсу) и коэффициент стойкости при резании. Для проведения других видов испытаний необходимо изготовление образцов-свидетелей — штабиков. Предел прочности при изгибе определяли на призматических

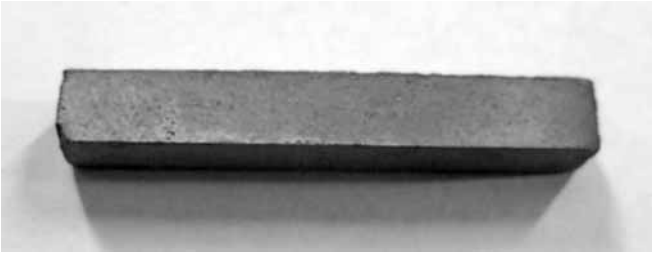


Рис. 1. Общий вид образцов — штабиков размерами 5×5×35 мм

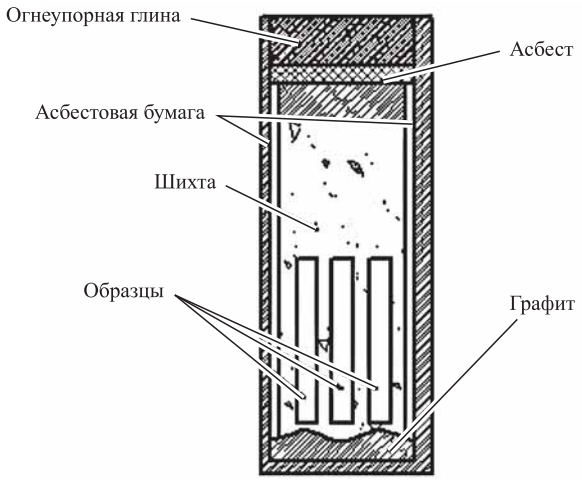


Рис. 2. Схема контейнера для термодиффузионного насыщения

образцах размерами 5×5×35 мм из твердого сплава ВК8 производства Кировоградского завода твердых сплавов по ГОСТ 25395—90 (рис. 1).

Для термодиффузионного насыщения поверхности использовали образцы — штабики из твердого сплава ВК8, которые помещали в контейнеры с насыщающим компонентом (рис. 2). Состав шихты: буферное вещество — Al_2O_3; активатор — NH_4Cl. В качестве насыщающего элемента использовали: желтую кровяную соль $K_4(Fe(CN)_6)$, буру B_4C, медь Cu (табл. 1).

В каждый контейнер загружали по пять штабиков ВК8 и шихту. Контейнеры герметизировали и подвергали нагреву в печи ПМ-5 до 900 °С, выдерживали при заданной температуре в течение 2...4 ч. Затем проводили охлаждение с печью в течение 6 ч (рис. 3). Также был проведен аналогичный опыт с образцами ВК8 с температурой нагрева до 1100 °С и выдержкой 4 ч при заданной температуре. Режимы ХТО второго опыта аналогичны первому.

При температуре 900 °С время выдержки составило 2 ч, охлаждение после выдержки проводили ступенями, что поддерживалось заданием электропечи: 800 °С, 1 ч; 700 °С, 1 ч; 600 °С, 1 ч; далее охлаждение с печью.

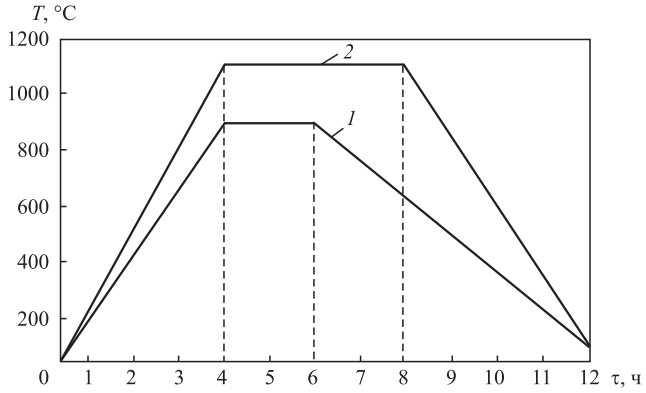


Рис. 3. Диаграмма нагрева образцов до различных температур:

1 — до 900 °С; *2* — до 1100 °С

1. Состав насыщающих сред

Номер опыта	Режим обработки	Состав шихты		
		Буферное вещество	Активатор	Насыщающий элемент
1	Насыщение ЖКС с активатором, T = 900 °С, τ = 2 ч	50 % Al_2O_3	1,5 % NH_4Cl	48,5 % $K_4(Fe(CN)_6)$
2	Насыщение ЖКС без активатора, T = 900 °С, τ = 2 ч		—	50 % $K_4(Fe(CN)_6)$
3	Насыщение бурой, T = 900 °С, τ = 2 ч		1,5 % NH_4Cl	48,5 % B_4C
4	Насыщение медью, T = 1100 °С, τ = 2 ч	88,5 % Al_2O_3		10 % Cu
5	Насыщение ЖКС + TiC, T = 1100 °С, τ = 2 ч	50 % Al_2O_3	—	25 % $K_4(Fe(CN)_6)$ + 25 % TiC
6	Цианирование, T = 1100 °С, τ = 2 ч	85 % Al_2O_3	10 % NaCl	2,5 % $(NH_2)2CO$ + 2,5 % Na_2CO_3
7	Насыщение ЖКС с активатором, T = 1100 °С, τ = 2 ч		1,5 % NH_4Cl	48,5 % $K_4(Fe(CN)_6)$

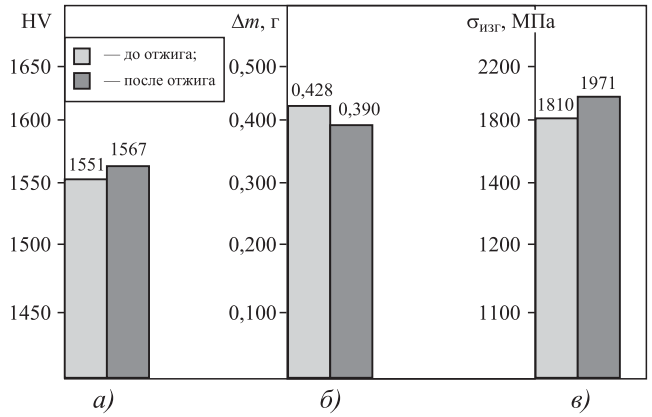


Рис. 4. Диаграмма механических свойств твердого сплава ВК8 до и после отжига (900 °С, 2 ч, охлаждение при 800 °С, 1 ч):

а — изменение твердости; *б* — абразивный износ; *в* — предел прочности при изгибе

На рис. 4 приведена диаграмма механических свойств твердого сплава ВК8 до и после отжига при 900 °С, выдержка 2 ч, охлаждение при 800 °С, 1 ч. Анализ диаграммы показал незначительное увеличение механических свойств после отжига (предел прочности при изгибе — на 6 %, износостойкость — на 5 %, твердость на 15 %). В связи с этим проведение отжига до ХТО нецелесообразно.

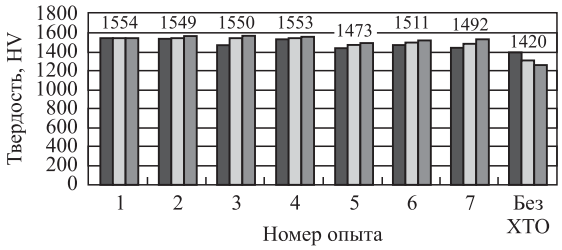


Рис. 6. Изменение твердости образцов ВК8 после различных видов ХТО

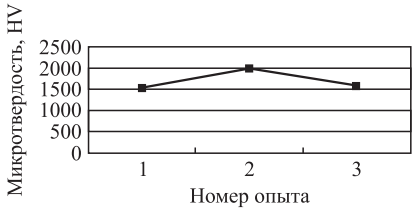


Рис. 7. Диаграмма микротвердости образцов ВК8 после различных видов ХТО

Микроструктуры образцов сплава ВК8 после проведения ХТО показаны на рис. 5.

Данные по твердости образцов ВК8 представлены в виде диаграммы сравнения параметров до и после термодиффузии (рис. 6). Получено небольшое изменение твердости во всех опытах после ХТО.

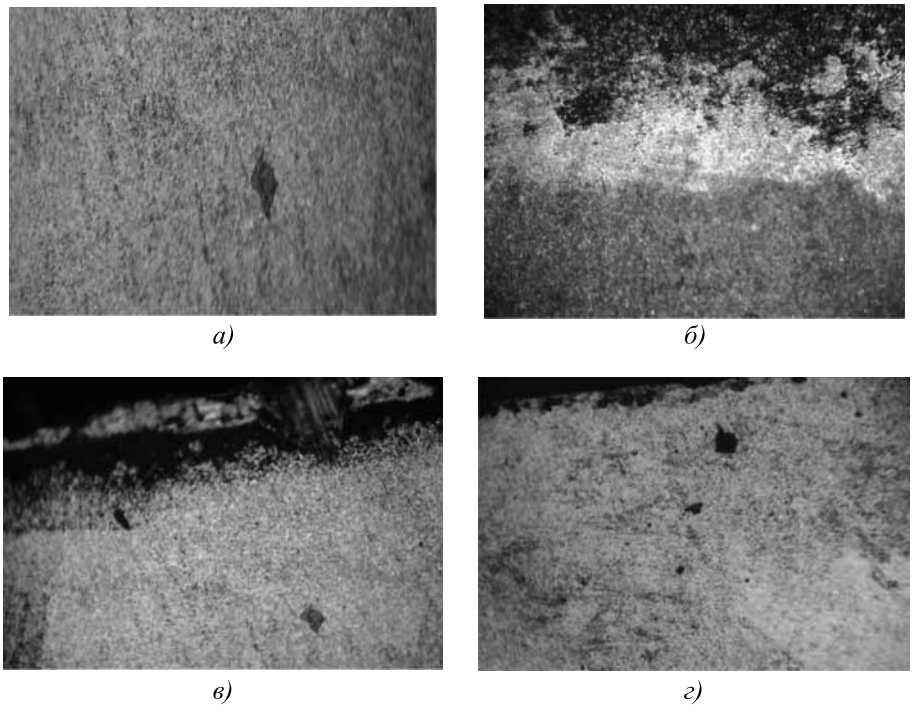


Рис. 5. Микроструктуры образцов твердого сплава ВК8 до и после термодиффузионного насыщения (×200):

а — исходный образец ВК8; *б* — насыщение ЖКС $K_4(Fe(CN)_6)$ без активатора, глубина термодиффузионного слоя $h = 420$ мкм; *в* — насыщение Cu, $h = 820$ мкм; *г* — насыщение ЖКС $K_4(Fe(CN)_6)$ с активатором NH_4Cl, $h = 320$ мкм

Анализ данных диаграмм показал, что режимы и составы для ХТО на твердость сплава ВК8 повлияли незначительно, по-видимому, это связано с недостаточной температурой ХТО. Изменение микротвердости представлено на рис. 7.

Результаты абразивных испытаний твердого сплава ВК8, обработанного по различным режимам ХТО, приведены на рис. 8, *а*. Установлено увеличение абразивной износостойкости по массе в сравнении с износостойкостью исходных образцов на 13 % в опыте № 1, на 27 % в опыте № 2, на 24,8 % в опыте № 3, на 11 % в опыте № 4, на 5 % в опыте № 5, на 1 % в опыте № 6, на 21 % в опыте № 7.

В опыте № 1 увеличение предела прочности при из-

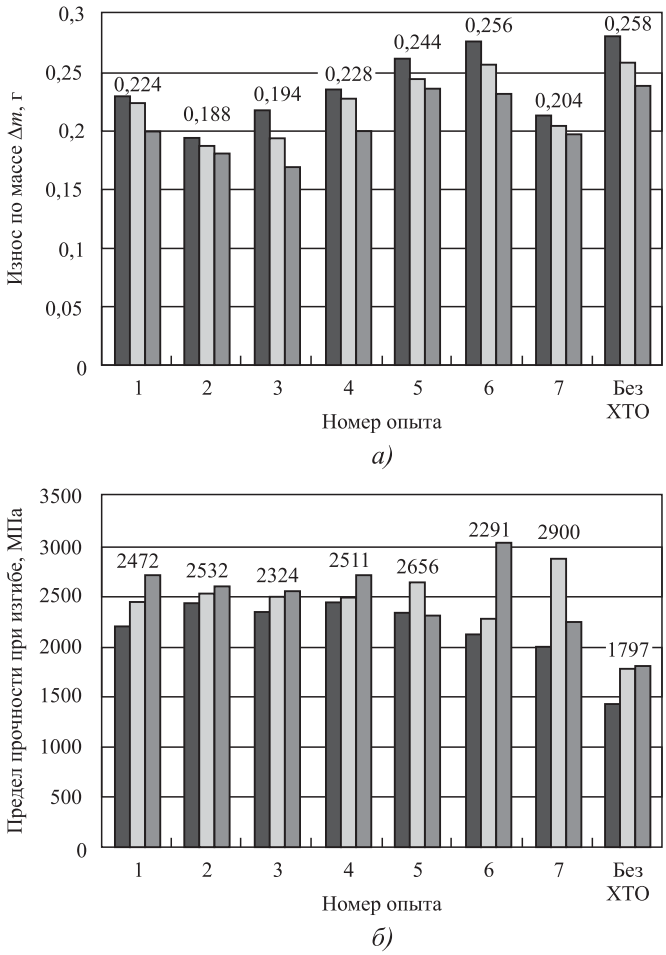


Рис. 8. Диаграммы сравнения износа по массе (*а*) и предела прочности при изгибе (*б*) твердого сплава ВК8 до и после ХТО

гибе (рис. 8, *б*) составило 37,5 % в сравнении с исходным значением, в опыте № 2 — 40 %, в опыте № 3 — уменьшение на 13,1 %, в опыте № 4 — увеличение на 40 %, в опыте № 5 — 48 %, в опыте № 6 — 27 %, в опыте № 7 — 61 %.

Предел прочности при изгибе твердосплавных штабиков измеряли на универсальной разрывной машине мод. ИР5047-50-10 с тензометрическим силоизмерителем ЦТИ-1 (рис. 9), позволяющим определять действующую нагрузку с погрешностью ±1 Н с помощью приспособления для определения предела прочности при изгибе, изготовленного согласно ГОСТ 18228—94 по ТУ 5808-0085.

Предел прочности при изгибе вычисляли по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{M}{W}, \qquad (1)$$

где $M = Fl/4$ — изгибающий момент Н·мм; F — максимальная нагрузка, Н; l — расстояние между опорами, мм; $W = bh_o^2/6$ — осевой момент сопротивления поперечного сечения образца, мм^3; b, h_o — ширина и высота образца соответственно, мм.

Для выявления изменения зависимости между пределом прочности при изгибе и относительной деформацией (по закону Гука, коэффициент зависимости — это модуль нормальной упругости E) применяли приклеиваемые проволочные тензодатчики сопротивления на бумажной основе. Схема нагружения показана на рис. 10.

Выбор приклеиваемых тензодатчиков в качестве преобразователей относительной деформации в электрический сигнал обусловливается рядом их положительных свойств: высокой точностью преобразования деформации при изменении сопротивления; практически

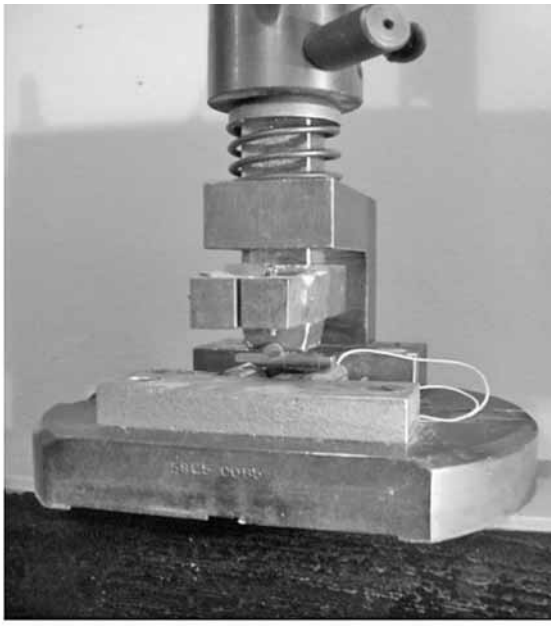


Рис. 9. Измеритель тензометрический цифровой (ЦТИ-1)

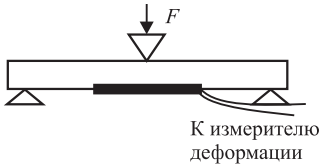


Рис. 10. Схема нагружения

2. Свойства образцов ВК8 после ХТО при 1100 °С, 4 ч, охлаждение с печью

Режим ХТО	Твердость, HV	Предел прочности при изгибе, МПа	Износ при истирании, г, в течение 30 с	Износ после точения, мм	
				по передней поверхности	по задней поверхности
Без ХТО	1420	1678	0,059	0,08	0,1
4	1553	2511	0,057	0,08	0,08
3	1473	1561	0,051	0,05	0,04
2	1549	2532	0,054	0,08	Скол
1	1554	2472	0,051	0,02	0,04

неограниченным частотным диапазоном; малыми габаритными размерами и массой, не оказывающими влияния на объект исследования; дистанционностью измерения.

Использовали датчики с базой 15 мм и сопротивлением 200 Ом. К образцам тензодатчики приклеивали молекулярным клеем немецкой фирмы Erich Krause, затем сушили при температуре 20 °С в течение 24 ч.

По показаниям ЦТИ-1 строили зависимости между пределом прочности при изгибе и относительной деформацией (рис. 11).

Относительную продольную деформацию ε определяли по формуле

$$\varepsilon = \Delta П k, \qquad (2)$$

где ΔП — разность показаний ЦТИ-1; k — тарировочный коэффициент, рассчитываемый

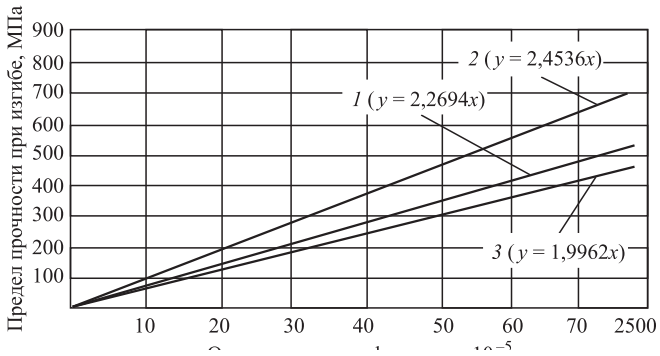


Рис. 11. Зависимость между пределом прочности при изгибе и относительной продольной деформацией для образцов ВК8 до и после ХТО:

1 — исходный образец; *2* — отжиг; *3* — насыщение ЖКС с активатором (T = 900 °С, τ = 2 ч)

на основе информации, указанной в сопроводительной документации к используемым тензодатчикам.

Анализ зависимости между пределом прочности при изгибе и относительной продольной деформацией (см. рис. 11) показал изменение модуля нормальной упругости после химико-термической обработки.

Стойкость образцов при истирании на алмазном диске заметно увеличилась. Нельзя сделать однозначный вывод по стойкостным испытаниям точением, так как наблюдается большой разброс величины износа даже на одинаково обработанных образцах (табл. 2). В дальнейших стойкостных испытаниях рекомендуется увеличить число проходов, поскольку износ после одного прохода зачастую неявный, а также связан с дефектным поверхностным слоем.

Применение ХТО твердых сплавов группы ВК дает повышение эксплуатационных свойств в 1,5—2 раза.

Заключение. В результате исследовательской работы по упрочнению изделий из твердых сплавов группы ВК с использованием ХТО установлено, что:

— твердость изделий повышается до 20 % по сравнению с исходной твердостью в состоянии поставки, прочностные и эксплуатационные свойства изделий увеличиваются в 1,5—2 раза;

— стойкость образцов при истирании на алмазном диске заметно повысилась;

— анализ зависимости между пределом прочности при изгибе и относительной про-

дольной деформацией указывает на изменение модуля нормальной упругости после химико-термической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Панов В.С., Чувилин А.М.** Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСИС, 2001. 428 с.
2. **Лошак М.Г.** Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наук. думка, 1984. 326 с.
3. **Термическая** обработка твердого сплава Т14К8 // Заготовительные производства в машиностроении / С.И. Богодухов, В.С. Гарипов, Е.С. Козик, Е.В. Солосина. 2012. № 12. С. 41—44.
4. **Бондаренко В.А., Богодухов С.И.** Обеспечение качества и улучшение характеристик режущих инструментов. М.: Машиностроение, 2000. 144 с.
5. **Способ** получения режущего инструмента из карбидосодержащих сплавов вольфрамовой (ВК) и титано-вольфрамовой (ТК) групп: пат. 2528539 РФ: МПК B22 F 3/ 24 / С.И. Богодухов и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Оренбургский государственный университет". № 2013121411/02; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.09.2014, БИ № 26. 6 с.
6. **Способ** термической обработки режущего инструмента с напаянной твердосплавной пластиной: пат. 2517093 РФ: МПК B22 F 3/ 24 / С.И. Богодухов, А.Д. Проскурин, Е.С. Козик, Б.М. Шейнин, Е.В. Солосина; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. № 2013014370/02; заявл. 09.04.2013; опубл. 27.05.2014. БИ № 15. 5 с.
7. **WC—TiC—Ni** cemented carbide with enhanced properties / Guo Zhixing, Xiong Ji, Yang Mei, Jiang Cijin // J. Alloys and Compounds. 2008. Vol. 465. № 1—2. P. 157—162.
8. **Влияние** режимов термической обработки на свойства твердосплавного режущего инструмента Т14К8 / Е.С. Козик, Б.М. Шейнин, А.О. Стрижов, Е.В. Свиденко // Вестник ОГУ. 2015. № 1. С. 194—200.

Станислав Иванович Богодухов, д-р техн. наук, ogu@mailgate.ru;
Елена Станиславовна Козик, канд. техн. наук;
Екатерина Валерьевна Свиденко, канд. техн. наук;
Владимир Станиславович Гарипов, канд. техн. наук

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 621.791

Д.Б. Слинко[1, 2], А.С. Дорохов[2], В.А. Денисов[2], В.А. Павлов[1, 2]
([1]Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
[2]Федеральный научный агроинженерный центр "ВИМ", г. Москва)

Технологические особенности восстановления валов плазменной наплавкой

Показана возможность применения метода плазменно-порошковой наплавки при восстановлении изношенных наружных цилиндрических поверхностей балансиров боевой машины пехоты. Разработаны технология и оборудование для наплавки и механической обработки.

Ключевые слова: балансир; плазменная дуга; порошок; наплавка; механическая обработка; твердость; микроструктура.

The possibility of using of the plasma-powder surfacing method for reconditioning of the balances worn out outer cylindrical surfaces of infantry-fighting vehicle is presented. Technology and equipment for surfacing and machining are developed.

Keywords: balancer; plasma arc; powder; surfacing; machining; hardness; microstructure.

Восстановление деталей является неотъемлемой частью машиностроительного производства. Использование восстановленных деталей для устранения неисправностей оборудования намного эффективнее, чем замена изношенных деталей на новые. Данное утверждение характерно для большинства видов техники, включая гусеничную технику.

В настоящее время гусеничная техника находит широкое применение во многих отраслях промышленности: строительной, добывающей, военной, в сельском хозяйстве. В процессе эксплуатации детали гусеничных машин, в частности, балансиры боевой машины пехоты (БМП) изнашиваются до предельного состояния. Данная деталь является металлоемкой, обладает высокой стоимостью, в связи с чем ее восстановление существенно снижает затраты предприятия при проведении капитального ремонта.

Данная работа посвящена задаче восстановления балансира, который используется в подвеске БМП-1.

Балансир (рис. 1) является элементом подвески ходовой части гусеничной машины, предназначенным для подвижного соединения опорного катка с корпусом машины. Балансиры выполняются в виде кривошипа, который условно можно разделить на три основные части: ось балансира, рычаг и ось катка.

Балансир БМП изготовлен из стали марки 38ХС (сталь конструкционная легированная, хромокремнистая), относящейся к трудносвариваемым сталям. Твердость поверхности шеек балансира составляет 280...320 НВ.

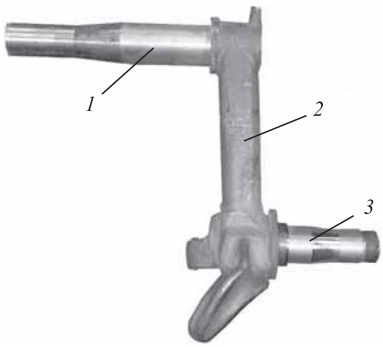


Рис. 1. Балансир БМП-1:
1 — ось балансира; *2* — рычаг; *3* — ось катка

Эксплуатация балансиров происходит в условиях абразивного и коррозионного износов, в результате чего ось катка изнашивается в среднем до 0,2 мм, а ось балансира — до 0,4 мм.

Для восстановления изношенных осей балансира был использован способ плазменно-порошковой наплавки с гравитационной схемой подачи порошка в дугу снаружи плазмотрона (рис. 2) [1].

Наиболее распространенные в практике методы подачи порошка в сжатую дугу потоком транспортирующего газа с учетом неравномерности распределения теплоты в дуговом промежутке характеризуются высокой неоднородностью нагрева частиц при переносе на наплавляемую поверхность. Поэтому свыше 10 % порошка переносится потоком транспортирующего газа за пределы сварочной ванны, которые относятся к технологическим потерям.

В то же время способ плазменно-порошковой наплавки с подачей порошка снаружи плазмотрона благодаря возможности регулирования в широком диапазоне соотношения между тепловой мощностью дуги и подачей присадочного порошка обеспечивает высокую производительность при минимальном проплавлении основного металла, что позволяет обеспечивать требуемую твердость и заданный химический состав наплавленного металла уже на расстоянии 0,3...0,5 мм от поверхности сплавления [2, 3].

При использовании данного способа плазменной наплавки ввод ламинарного узкоцилиндрического потока порошка в область наибольших температур столба сжатой дуги обеспечивает максимальную интенсивность и продолжительность теплообмена порошкообразного присадочного материала при переносе частиц плазменными потоками на наплавляемую поверхность в расплавленном состоянии в область активного пятна дуги на изделии [4]. В результате существенно повышается качество сплавления с основным металлом при устойчивом формировании покрытия на уровне минимальной погонной энергии, что обеспечивает минимальный уровень тепловложения и деформаций.

Все работы по плазменно-порошковой наплавке изношенных поверхностей балансира проводили с использованием установки, разработанной на базе переоборудованного токарного станка 16К20 (рис. 3).

В связи с конструктивными особенностями детали (радиус кривошипа 360 мм) была проведена модернизация станка для обеспечения беспрепятственного вращения балансира. Для этого был осуществлен подъем передней и задней бабок станка на 400 мм, что повлекло за собой необходимость замены зубчатой

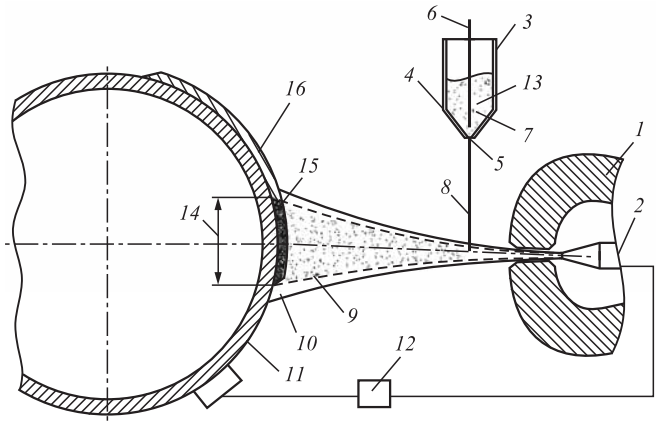


Рис. 2. Схема плазменно-порошковой наплавки с подачей порошка в дугу снаружи плазмотрона:

1 — плазмотрон; *2* — вольфрамовый электрод; *3* — порошковый питатель; *4* — выпускная полость; *5* — дозирующее отверстие; *6* — запорная игла; *7* — порошок; *8* — поток порошка; *9* — столб сжатой дуги; *10* — сжатая дуга; *11* — наплавляемая поверхность; *12* — источник сварочного тока; *13* — зона ввода; *14* — пятно нагрева; *15* — сварочная ванна; *16* — наплавленный слой

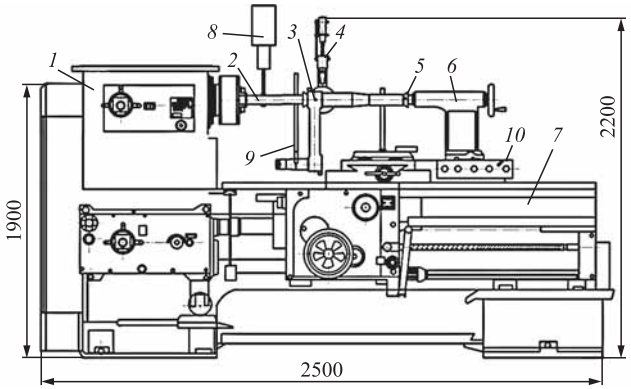


Рис. 3. Схема переоборудованного станка 16К20 с установленным комплектом для плазменно-порошковой наплавки:

1 — бабка передняя; *2* — центр; *3* — балансир; *4* — головка наплавочная; *5* — грибок; *6* — бабка задняя (пиноль); *7* — станина станка 16К20, *8* — противовес; *9* — поводок; *10* — пульт управления

передачи на цепную. Посредством уменьшения ведущего шкива ременной передачи были достигнуты необходимые обороты шпинделя (с 12,5 до 6 оборотов).

Для закрепления балансира в станке была разработана и установлена специализированная оснастка, состоящая из центра для передней бабки, грибка для задней бабки, противовеса и поводка, крепящихся к центру. Для реализации процесса плазменно-порошковой наплавки был также разработан и изготовлен комплект для плазменно-порошковой наплавки, включающий в себя шкаф управления, плазмотрон и порошковый питатель.

В качестве источника питания плазменной дуги был использован сварочный выпрямитель ВДУ-506С. Управление установкой осуществлялось с помощью кнопок и переключателей на выносном пульте управления.

В процессе отработки технологии были экспериментально определены режимы наплавки: ток наплавки 190...220 А; напряжение дуги 22 В; общий расход смеси порошков 60 г/мин; расход защитного газа 7...8 л/мин; расход плазмообразующего газа 2...4 л/мин; расход охлаждающей воды 3...4 л/мин; продольная подача 4 мм/об; частота вращения детали 6 об/мин. Наплавку выполняли на 0,8 мм на сторону.

Для получения наплавленного металла заданной твердости были проведены исследования по выбору оптимального состава порошкового материала. По результатам экспериментальных исследований для наплавки изношенных поверхностей балансира выбрана порошковая смесь ПР-Н9Г4СР (ФМИ-5) и ПР-Н4Д2М в соотношении 1:1 (фракция 80...160 мкм).

Исследования показали, что данная смесь обеспечивает высокое качество наплавленного слоя без пор и трещин (рис. 4), а также — микротвердость наплавленного слоя в среднем 400 HV (рис. 5).

Разработанная технология восстановления балансиров включает в себя проведение механической обработки в три этапа на токарном станке мод. 165 с оснасткой для механической обработки балансиров (рис. 6).

На первом этапе осуществляли предварительную механическую обработку перед наплавкой в целях снятия дефектов поверхности и занижения диаметров оси балансира и оси катка на 0,5 мм для унификации последующего процесса наплавки всех шеек на одних и тех же режимах.

На втором этапе после наплавки проводили токарную обработку восстановленных поверхностей для получения номинальных размеров осей балансира.

На третьем этапе выполняли финишную механическую обработку осей балансира шлифованием с использованием лепесткового шлифовального круга в соответствии с требованиями рабочего чертежа.

В результате был разработан технологический процесс восстановления балансира с вы-

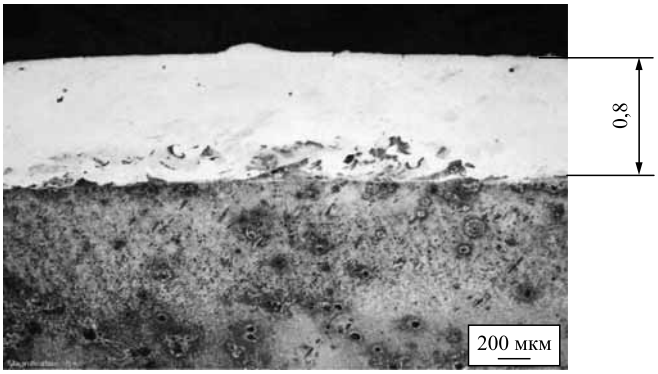


Рис. 4. Микроструктура наплавленного образца. ×50

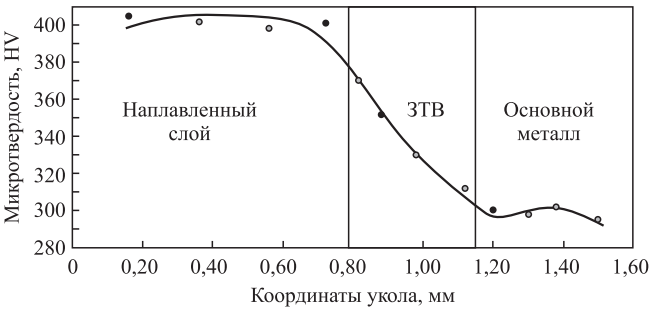


Рис. 5. Микротвердость по глубине шлифа

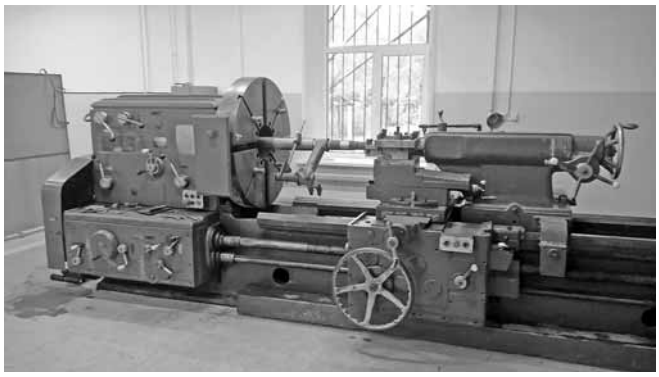


Рис. 6. Токарный станок мод. 165 с оснасткой для механической обработки балансиров

соким качеством наплавленной поверхности, отвечающей эксплуатационным требованиям работы балансира.

Данные технология и оборудование внедрены в эксплуатацию в ОАО "103 Арсенал" (г. Саранск).

Выводы

1. Причиной возникновения дефектов балансира являются коррозионный и абразивный износы. Износы оси балансира и оси катка составляют не более 0,4 и 0,2 мм соответственно.

2. Наиболее рациональный метод для восстановления балансиров — метод плазменно-порошковой наплавки с внешним вводом порошка в дугу, обеспечивающий получение наплавленного слоя до 0,8 мм без пор и трещин.

3. Разработаны специализированная установка для наплавки балансиров на базе токарного станка 16К20 и комплект оснастки для плазменно-порошковой наплавки с внешним вводом порошка в дугу.

4. Проведена модернизация токарного станка мод. 165, обеспечивающего выполнение токарной и шлифовальной операций для механической обработки балансиров БМП-1.

5. Для наплавки изношенных шеек балансиров разработана порошковая композиция из смеси порошков ПР-Н9Г4СР и ПР-Н4Д2М в соотношении 1:1, обеспечивающая получение покрытий необходимой твердости без пор и трещин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2412030 РФ, МПК B23K 9/04.** Способ плазменной наплавки / Н.М. Ожегов, В.П. Пазына. Заявл. 09.12.2008; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5.

2. **Пат. 2479392 РФ, МПК B23K 9/04.** Способ плазменной наплавки / Н.М. Ожегов, В.П. Пазына, Д.А. Капошко, А.В. Бармашов. Заявл. 11.04.2011; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11.

3. **Слинко Д.Б., Соловьев Р.Ю., Кавешник А.В.** Опыт использования плазменно-порошковой наплавки при восстановлении полуосей эскалаторов метрополитена // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 121. С. 243—249.

4. **Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А.** Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 406 с.

Дмитрий Борисович Слинко, канд. техн. наук,
maks52@inbox.ru;
Алексей Семенович Дорохов, д-р техн. наук;
Вячеслав Александрович Денисов, д-р техн. наук;
Владислав Алексеевич Павлов

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2018 г.

Колесников А.Г., Лавриненко В.Ю. 150 лет факультету "Машиностроительные технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана . . . . . № 11

Литейное и сварочное производства

Абрамова Н.Б. Технология изготовления заготовок для медных стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок . . . . . № 4

Акутин А.А., Кабанов Н.П. Влияние добавки NaCl на свойства гипсовых смесей и форм для отливок из алюминиевых сплавов . . . . . № 4

Батышев К.А., Батышев А.И., Семенов К.Г., Демьянов Е.Д., Юсипов Р.Ф. Кристаллизация под давлением доэвтектических и заэвтектических силуминов . . . . . № 11

Гавариев Р.В., Панкратов Д.Л. Исследование поверхности отливок из сплавов цветных металлов при литье в металлические формы . . . . . № 8

Гладких И.В. Использование промышленных отходов для изготовления футеровки ковшей в литейном производстве машиностроительных заводов . . . . . № 3

Давыдов А.К. Формирование донной части электрошлаковой отливки и наплавленного слоя . . . . . № 3

Изотов В.А., Шаповалова М.А., Чибирнова Ю.В., Равочкин А.С., Вишталюк А.А. Использование наноуглерода для модифицирования алюминиевых сплавов при литье в низкотеплопроводные формы . . . . . № 2

Кидалов Н.А., Адамова А.С., Безбабнова Т.Ю., Попов Д.И. Влияние фракции песка на свойства формовочных смесей . . . . . № 6

Кидалов Н.А., Осипова Н.А., Поташова И.Е., Алиев Д.О., Цыбранков В.А. Исследование свойств хромитово-кварцевой формовочной смеси . . . . . № 10

Комаров О.Н., Жилин С.Г., Предеин В.В., Попов А.В. Влияние процессов индукционного переплава стали, полученной алюмотермией, на структуру и свойства отливок . . . . . № 7

Комаров О.Н., Предеин В.В., Жилин С.Г., Абашкин Е.Е. Особенности формирования структуры и свойств отливок из алюмотермитного сплава, полученных в углеродный кокиль . . . . . № 12

Кочергин В.С., Куц В.В., Привалов Э.Н., Разумов М.С. Повышение качества и производительности операции сварки вала трубы и винтовой спирали шнеков для буровых установок . . . . . № 8

Лебедев В.А. Совершенствование механизированной дуговой сварки и наплавки легированных сталей с импульсной подачей электродной проволоки . . . № 10

Лебедев В.А., Жук Г.В. Аналитическое определение времени формирования и времени переноса капли электродного металла при механизированной сварке . . . . . № 2

Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Маслов К.А., Романов А.С. Опыт применения магналия в производстве отливок ответственного назначения . . . . . № 5

Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Использование установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для улучшения качества листов из стали для сварных труб . . . № 9

Малютин К.В., Овчинников В.В. Влияние дефектов на долговечность износостойких покрытий, выполненных аргонодуговой наплавкой на сталь ВНЛ-3 . . . . . № 9

Михеев Р.С. Инновационные пути в создании антифрикционных композиционных покрытий на основе цветных сплавов с повышенными триботехническими свойствами . . . . . № 5

Морозов В.П., Романов Ю.Г. Экспериментальное исследование влияния различных факторов на процесс образования трещин при лазерной наплавке никелевого сплава системы Ni—Cr—B—Si на поверхность конструкционной стали . . . . . № 11

Овчинников В.В., Антонов А.А. Особенности свариваемости алюминиевого сплава 1913 в условиях сварки плавлением и трением с перемешиванием . . . № 1

Овчинников В.В., Губин А.М., Курбатова И.А. Сварка трением с перемешиванием дисперсно-армированных керамическими частицами композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов . . . № 4

Орлик Г.В., Орлик А.Г., Коростелкин А.С. Исследование особенностей формирования структуры сварного шва стали 08Х18Н10Т и ее влияние на стойкость к межкристаллитной коррозии . . . . . № 7

Соловьева И.В., Давыденко Л.В., Овчинников В.В. Влияние эксплуатационных нагревов на свойства и структуру сварных соединений алюминиевого сплава 1151Т1 . . . . . № 6

Соловьева И.В., Овчинников В.В., Давыденко Л.В. Влияние подварок на свойства сварных соединений сплава 1151Т1, выполненных аргонодуговой сваркой . . . . . № 12

Тахиров А.А., Гущин Н.С., Нуралиев Н.Ф., Андреев В.В. Инновационная технология изготовления из среднелегированного хромоникелевого чугуна тонкостенных отливок с повышенной эксплуатационной стойкостью . . . . . № 1
Федулов В.М., Изотов В.А., Кулик Е.Е., Бессуднов И.А., Вишталюк А.А. Влияние степени заполнения модели на ударную вязкость при FDM-печати литейной оснастки . . . . . № 5
Хлямков Н.А., Балакин С.М., Петров С.Н., Беляева Л.А. Развитие термоусталостных трещин и изменений в структуре чугуна с пластинчатым графитом в интервале температур эксплуатации изложниц . . . . . № 3
Шатульский А.А., Чибирнова Ю.В. Моделирование процесса заполнения формы расплавом для отливок типа "лопатка" . . . . . № 1
Шипельников А.А., Роготовский А.Н., Бобылева Н.А. Исследование гидродинамики расплава в условиях стационарного теплообмена в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок . . . № 2

Кузнечно-штамповочное производство

Анцифиров А.А., Кривошеин В.А., Зимов Д.В. Совершенствование конструкции гидравлического пресса . . . . . № 5
Белевитин В.А., Смирнов Е.Н., Коваленко С.Ю., Скляр В.А., Суворов А.В. Интенсификация сдвиговых деформаций при ковке трехлучевых слитков . . . № 2
Бессмертная Ю.В., Кухарь В.Д., Малышев А.Н. Определение силовых параметров вытяжки глубоких изделий коробчатой формы из цилиндрических полуфабрикатов . . . . . № 1
Воронцов А.Л., Карпов С.М. Повышение адекватности моделирования процессов обработки давлением путем учета упругих деформаций инструмента:
1. Выдавливание стаканов из упрочняющегося материала . . . . . № 9
2. Учет упругой деформации штампа при описании процесса закрытой штамповки . . . . . № 10
Грязев М.В., Ларин С.Н., Пасынков А.А. Оценка влияния технологических факторов на предельный коэффициент отбортовки листовых анизотропных заготовок . . . . . № 8
Евсюков С.А. Учет объемности схемы напряженного состояния при анализе напряженного состояния в формоизменяющих операциях листовой штамповки . . . . . № 11
Калюжный В.Л., Алиева Л.И., Алиев И.С., Горностай В.Н. Горячая объемная штамповка полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава с заданными механическими свойствами . . . . . № 12
Лавриненко В.Ю. Повышение энергоэффективности кузнечно-штамповочного оборудования ударного действия . . . . . № 11
Лавриненко В.Ю., Поляков А.О. Область рационального использования метода сжатия для получения кольцевых деталей . . . . . № 9
Лавриненко В.Ю., Чекалов В.П., Аюпов Т.Х. Применение бабы молота с наполнителем для модернизации штамповочного молота с массой падающих частей 1000 кг . . . . . № 1
Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р. Построение математической модели процесса гибки листовых заготовок с использованием бабы листоштамповочного молота с наполнителем . . . . . № 4
Ларин С.Н., Коротков В.А., Платонов В.И., Самсонов Н.А. Устранение фестонообразования с использованием матрицы с профильной заходной поверхностью . . . . . № 6
Лисунец Н.Л., Хоанг Мань Жой. Исследование процесса осадки в закрытой цилиндрической матрице при производстве заготовок для холодной объемной штамповки . . . . . № 6
Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н., Иванов Е.В., Ризаханов Р.Р. Сопротивление деформации пористого силумина при повышенных температурах . . . . . № 8
Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С., Дронов А.И., Хорев В.А. Влияние режимов наружной высадки концов труб на силу обратного хода пуансона . . . . . № 2
Складчиков Е.Н., Артюховская Т.Ю., Трух С.С. Автоматическая компенсация износа фрикционных элементов муфт включения кривошипных прессов . . . . . № 4
Соков В.И., Крук А.Т., Соков И.И., Крук В.А. Система управления муфтами кривошипных горячештамповочных прессов на базе пневмоголовки У328А . . . . . № 5
Черняев А.В., Гладков В.А. Расчетная модель выдавливания внутреннего фланцевого утолщения на трубе . . . . . № 3
Чудин В.Н. Вытяжка с нагревом конической заготовки для газоформовки оболочки . . . . . № 3
Чудин В.Н. Газоформовка оболочки в условиях нелинейной вязкости материала . . . . . № 7
Яковлев С.С. (мл.), Коротков В.А. Способ получения рифлей на внешней поверхности цилиндрических заготовок . . . . . № 7

Прокатно-волочильное производство

Абрамов А.Н., Боткин А.В., Балышева Э.Г. Влияние физико-химических свойств смазочного материала на шероховатость поверхности деформируемой заготовки при волочении . . . . . № 7
Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В. Оценка в поперечном сечении проволоки вдоль рабочего канала волоки степени деформации материальных волокон с разным направлением к оси волочения . . . № 6
Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В. Показатели деформации в проходе волочения в зависимости от коэффициентов упрочнения материала проволоки и контактного трения . . . . . № 10
Делюсто Л.Г. Технология вибрационной очистки и волочения проволоки . . . . . № 8
Железняк Л.М., Савиных В.В., Василевский П.А. Применение прокатно-волочильного стана в производстве изделий для электромашиностроения . . . . . № 8
Максимов Е.А., Устиновский Е.П. Исследование технологических параметров правки и мощности главного привода листовой правильной машины . . . . № 7
Мунтин А.В., Солдатов Е.А. Современное оборудование для охлаждения горячекатаной полосы на отводящем рольганге непрерывных широкополосных станов и литейно-прокатных комплексов . . № 3
Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Губанов С.А., Новоселов А.Э. Математическое моделирование и сравнительный анализ деформированного состояния металла при асимметричной прокатке и равноканальном угловом прессовании . . . . . № 4
Поворов С.В., Егоров Д.В. Исследование процесса формовки детали в виде швеллера путем экспериментального исследования и математического моделирования . . . . . № 5
Поксеваткин М.И., Басова Е.М., Поксеваткин Д.М. Моделирование и оптимизация процесса формообразования сортового профиля в закрытых роликовых калибрах . . . . . № 12
Путырский С.В., Плохих А.И. Анализ условий формирования ламинарной структуры в многослойных стальных материалах при горячей пакетной прокатке . № 11
Сметанин С.В. Современная технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов . . . . . № 1
Сметанин С.В. Современная технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов. (*Продолжение*) . . . № 2
Шапарев А.В., Савин И.А. Влияние состояния контактных поверхностей на формирование соединения стали и латуни при холодном плакировании . . . № 12
Шинкаревич Ю.П., Минязева Л.Х. Применение фазохронометрического метода для оценки технического состояния прокатного оборудования . . . . № 9

Материаловедение и новые материалы

Базылева О.А., Унчикова М.В., Артеменко Ю.В., Шестаков А.В. Влияние термической обработки на структуру интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al, полученного по ресурсосберегающей технологии . . . . . № 1
Байжуманов М.К., Утепов Е.Б., Карипбаев С.Ж., Карменов К.К. Создание демпфирующих металлических материалов для деталей авиационной техники . . . . . № 8
Бенариеб И., Пучков Ю.А. Разработка методики расчета параметров С-кривых диаграмм температура—время—свойство деформируемых сплавов системы Al—Mg—Si . . . . . № 2
Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В., Гарипов В.С. Термодиффузионное насыщение твердых сплавов группы ВК . . . . . № 12
Бутыгин В.Б., Собачкина Л.Д. Технологические свойства быстрорежущих сталей с интерметаллидным упрочнением . . . . . № 6
Глебов В.В., Матвеев Ю.И., Хлыбов А.А. Влияние легирования на механические и коррозионные характеристики стали типа 23Х15Н7М2 . . . . . № 6
Каменская Н.И. Восстановление микроструктуры паропроводных труб из стали 15Х1М1Ф после длительной эксплуатации на ТЭС . . . . . № 5
Котов С.А., Бурлова А.Н., Зверева Е.Д. Получение композиционного материала с редкоземельными металлами методом прокатки . . . . . № 3
Кочешков И.В. Структура волокнистых металлокомпозитов, полученных из различных листовых заготовок . . . . . № 8
Курганова Ю.А., Чэнь И. Получение образцов литейного металломатричного композиционного материала системы Al—нановолокно Al_2O_3 . . . . . № 11
Луц А.Р., Закамов Д.В. Термодинамическая оценка рафинирующего воздействия солей Na_3AlF_6 и Na_2TiF_6 на синтез системы Al—10 % (Ti—C) . . . . . № 7
Олунд К.Э.И.К., Лукович М., Вейдоу Д., Тувандер М., Офферман С.Э. Сравнение ультравысокопрочной и обычной высокопрочной сталей для изготовления крепежа: механические свойства при повышенной температуре и микроструктурные механизмы . . . . . № 10
Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А., Мизера С.В., Балаклейский Н.С., Логинов А.Б. Методика исследования тонкой структуры коллоидно-графитовых пленок на поверхности стальных образцов с различной шероховатостью . . . . . № 5

Петров А.Н., Соляков А.П., Петров М.А. Исследование структуры заготовок из жаропрочных сплавов после нагрева в расплаве соли хлористого бария . . . . . № 3
Севальнёва Т.Г., Севальнёв Г.С., Курганова Ю.А. Исследование эволюции микроструктуры гранулируемого никелевого сплава системы Ni—Cr—Mo—Al—Co в процессе горячего изостатического прессования и последующей термической обработки . . . . . № 7
Семенов А.Б., Смирнов А.Е., Муранов А.Н., Куцбах А.А., Семенов Б.И. Влияние термической и химико-термической обработки на структуру и свойства хромомолибденовой стали 38ХМА в изделиях, полученных MIM-методом . . . . . № 11
Скачков О.А., Дроздов А.А., Березина Т.А., Поварова К.Б., Морозов А.Е., Пожаров С.В., Карпухин С.Д. Порошковые сплавы FeCrAl и NiAl. II. Механоактивация порошков . . . . . № 9
Титова Ю.В., Майдан Д.А., Сафаева Д.Р. Развитие азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза нанопорошка SiC . . . № 4

Информация

Габельченко Н.И., Белов А.А., Кидалов Н.А. Повышение срока службы рабочих элементов смесителей-пневмонагнетателей . . . . . № 3
Колесников А.Г., Комиссарчук Ю.С., Филатов А.А. Современные методы резки горячих стальных заготовок крупных сечений . . . . . № 6
Кухарь В.Д., Ларин С.Н. IV международная научно-техническая конференция "Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением", посвященная 60-летию со дня рождения С.С. Яковлева . . . . . № 1
Лисунец Н.Л. К 80-летию со дня рождения Юрия Анатольевича Зимина . . . . . № 10
Полянский С.Н., Бутаков С.В., Ольков И.С., Ледер М.О., Попов М.В., Мальцев Л.В. Методы удаления окалины и газонасыщенного слоя с поверхности полуфабрикатов из сплавов титана . . . . . № 7
Саранин Л.Г., Маленко П.И., Захаров С.К., Белов Д.Б. Сравнительный анализ определения химического состава сплавов на основе черных и цветных металлов оптико-эмиссионным методом и методом химического анализа . . . . . № 9
Семенов К.Г., Батышев К.А., Чернов В.В. Анализ легирующих элементов для синтеза низколегированных сплавов на основе меди . . . . . № 9
Складчиков Е.Н., Лазуткин А.В. Расчет долговечности двигателей главного и вспомогательных приводов кривошипных прессов . . . . . № 3
Слинко Д.Б., Дорохов А.С., Денисов В.А., Павлов В.А. Технологические особенности восстановления валов плазменной наплавкой . . . . . № 12
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2018 г. . . . . № 12
Филиппов Ю.К., Петухов И.С., Пономарев А.Н., Козлечков А.В., Умаров С.М. Художественная рельефная чеканка подарочных юбилейных медалей . . . . . № 4
Цирков П.А., Тялина Д.А., Хованская В.А. Оборудование для восстановления валков станов горячей прокатки с применением дуго-контактной наплавки . . . . . № 2
Цирков П.А., Тялина Д.А., Хованская В.А. Особенности технологии восстановления валков станов горячей прокатки . . . . . № 10
Чекалов В.П. 20 лет Российской кузнечной академии им. А.И. Зимина . . . . . № 6

80 лет

Борису Ивановичу Семёнову,

доктору технических наук, профессору

Борис Иванович Семёнов родился 6 декабря 1938 г. в Москве. После окончания с отличием МВТУ им. Н.Э. Баумана по специальности "Машины и технология литейного производства" с 1961 по 1975 г. работал в должности ассистента кафедры "Высшая математика", ассистента, старшего преподавателя и доцента кафедры "Машины и автоматизация литейного производства". Пройдя в 1963—1964 гг. стажировку в Бирмингемском университете, Борис Иванович поступил в аспирантуру на "родную" кафедру и в 1968 г. под руководством заслуженного деятеля науки и техники, профессора Г.Ф. Баландина защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук и продолжил работу на кафедре.

С 1975 по 2001 г. доцент Б.И. Семёнов работал во Всесоюзном заочном машиностроительном институте (ныне — МИРЭА — Российский технологический университет). В 1986 г. Борису Ивановичу присуждена ученая степень доктора технических наук. В 1988 г. Б.И. Семёнов возглавил первую в СССР кафедру, специализирующуюся в области металлических композиционных материалов.

В 2001 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана была создана кафедра СМ-13 "Ракетно-космические композитные конструкции" и профессор Б.И. Семёнов приглашен на должность заместителя заведующего новой кафедры. В рамках развития учебного процесса в 2002 г. на кафедре СМ-13 по инициативе Бориса Ивановича создана лаборатория физико-химических основ новых технологий, которая в результате проводимых междисциплинарных исследований в 2015 г. приобретает статус Межфакультетской и под названием "Новые способы и технологии литья" продолжает работу со специалистами кафедр факультета "Машиностроительные технологии". Под научным руководством Б.И. Семёнова в лаборатории развивается новое для России направление исследований — металлургия тиксотропных материалов, объединяющая Thixo-технологии и технологии инжекционного литья полимерно-порошковых смесей (PIM).

Основной областью научных интересов Бориса Ивановича Семёнова являются теория и технология металломатричных композиционных материалов и структурируемых многофазных сред. Результаты его исследований опубликованы в более 150 научных работах, патентах на изобретения и монографии "Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии", которая в настоящее время является единственным в России справочно-учебным пособием, отражающим научные основы Thixo-технологий. Теоретическая и практическая значимость этой книги отмечена в 2015 г. золотой медалью Международной выставки "Металл-Экспо".

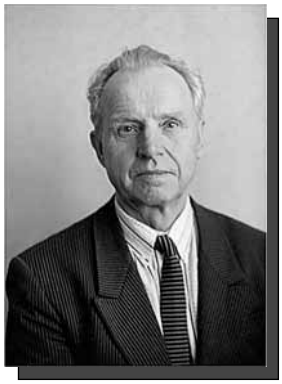
Под руководством профессора Б.И. Семёнова защищено более 15 кандидатских диссертаций. Высокой оценкой многолетнего добросовестного труда Бориса Ивановича являются награда "Почетный работник высшего профессионального образования России" и почетное звание "Заслуженный работник высшей школы РФ" за заслуги в научно-педагогической деятельности и большой вклад в подготовку квалифицированных кадров.

Б.И. Семёнов является членом редакционного совета и автором нашего журнала.

Коллектив редакции и редакционный совет журнала от всей души поздравляют Бориса Ивановича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, благополучия и дальнейшей плодотворной деятельности!

Памяти Геннадия Ивановича Тимофеева

(к 85-летию со дня рождения)



Среди известных советских и российских литейщиков страны почетное место занимает д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Машины и технология литейного производства" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (ранее — Горьковский политехнический институт), заслуженный деятель науки и техники РСФСР Геннадий Иванович Тимофеев.

Г.И. Тимофеев родился 10 декабря 1933 г. в деревне Котомкино Варнавинского района Горьковской (Нижегородской) области. В 1951 г. поступил на металлургический факультет Горьковского политехнического института, после окончания которого получил диплом инженера-технолога по литейному производству.

Отличные знания, полученные в институте, хорошие организаторские способности помогли ему пройти путь от мастера литейного цеха Горьковского автозавода до крупнейшего ученого и специалиста страны в области литейного производства.

В 1962 г. Г.И. Тимофеев защитил кандидатскую диссертацию в Харьковском политехническом институте по теме "Разработка и исследование процесса литья намораживанием под давлением".

С 1961 г. Геннадий Иванович работал на преподавательских должностях Горьковского политехнического института. В 1970 г. он защитил докторскую диссертацию по теме "Исследование механизма образования пористости в отливках и разработка технологических процессов литья плотных герметичных деталей из цветных сплавов".

После защиты докторской диссертации с 1970 по 1982 г. Г.И. Тимофеев работал деканом металлургического факультета и заведующим созданной им кафедры "Машины и технология литейного производства". Возглавляя с 1974 г. кафедру, он всю свою энергию и знания направлял на развитие учебного процесса, приближение курсового и дипломного проектирования к реальному производству. Для повышения качества обучения и проведения научных работ по его инициативе была организована научно-исследовательская лаборатория "Специальные виды литья". К исследованиям широко привлекались студенты. Полученные результаты проходили апробацию на предприятиях г. Горького и Горьковской области. Благодаря этим работам значительно расширились и окрепли связи кафедры с ведущими предприятиями региона.

С 1982 по 1990 г. Геннадий Иванович одновременно работал в должности проректора по научной работе Горьковского политехнического института.

За годы творческой научной деятельности Г.И. Тимофеев внес заметный вклад в теорию и практику литейного производства в области цветного литья, особое внимание уделяя формированию качественных отливок. С его именем связаны научные и технологические основы плавки и литья цветных сплавов, повышение герметичности отливок, специальные способы литья, САПР литейной технологии и оснастки и ряд других направлений.

Геннадий Иванович подготовил 4 д-ра техн. наук и 33 канд. техн. наук. Высокая творческая активность (более 300 статей и докладов, 47 авторских свидетельств и патентов, 12 монографий и брошюр), постоянное внимание к воспитанию и подготовке научных кадров — отличительные черты Г.И. Тимофеева. Наряду с научной работой, Геннадий Иванович был прекрасным семьянином, увлекался спортом и музыкой, охотой и рыбалкой. Все это характеризует его как крупного ученого, педагога и человека.

За большую трудовую, общественную и научную деятельность Г.И. Тимофеев был награжден высокими правительственными наградами: орденом "Знак почета" (1976 г.), ему были присвоены звания "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР" (1983 г.) и "Почетный работник высшего профессионального образования России" (1999 г.), он был избран действительным членом Академии наук Чувашской республики. С 1981 по 1997 г. был членом экспертного совета ВАК и председателем специализированного диссертационного совета Нижегородского государственного технического университета по защите докторских и кандидатских диссертаций.

Г.И. Тимофеева знали и уважали специалисты в области литейного производства не только в нашей стране, но и за рубежом. Его кончина в 2007 г. стала большой утратой для всех литейщиков. Светлая память о крупном ученом и педагоге навсегда останется в сердцах его учеников и коллег. Геннадий Иванович будет всегда примером трудолюбия и профессионализма, высоких нравственных принципов.

Коллектив кафедры "Металлургические технологии и оборудование"
Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Металлообработка. Сварка–2019

19-я Международная выставка современных технологий, оборудования, материалов для машиностроения, металлообрабатывающей промышленности и сварочного производства

20—22 марта 2019 г. **г. Екатеринбург**

Место проведения: Международный выставочный центр "Екатеринбург-Экспо"

Основные тематические разделы:

- Продукция машиностроительных предприятий для нужд промышленности
- Металлообрабатывающее оборудование (новое и бывшее в употреблении)
- Сварочное оборудование и материалы
- Контрольно-измерительное оборудование
- Системы автоматического проектирования
- Программные продукты для организации и управления производством
- Лазерное оборудование
- Генераторное и компрессорное оборудование
- Смазки и СОЖ
- Комплектующие изделия и материалы, техоснастка
- Средства защиты
- Техника безопасности
- Экологическая безопасность
- Инвестиционные проекты
- Техническая литература и информация

NEW! Металлургия и литье:

- Металлургические технологии, оборудование для подготовительного и литейного производства

По данным www.exponet.ru

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 10.10.2018. Подписано в печать 28.11.2018. 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.