ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 4 апрель 2016

Председатель редакционного совета и главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И., д.т.н., проф.

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

Зам. главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

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

Ответственный за подготовку и выпуск номера
СЕРИКОВА Е.А.

Журнал зарегистрирован в Министерстве связи и массовых коммуникаций РФ. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63952 от 09.12.2015

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Жижкина Н.А. Разработка технологии внепечной обработки расплава высоколегированного чугуна для рабочего слоя центробежно-литых валков 3
Овчинников В.В., Дриц А.М., Курбатова И.А., Гуреева М.А. Технологические аспекты подготовки поверхности деформируемых алюминиевых сплавов под дуговую сварку 7

Кузнечно-штамповочное производство

Соболев Я.А., Чудин В.Н., Кузнецов М.В. Формообразование корпусных трехслойных стрингерных панелей 16
Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Шнайдер Л.Б. Реконструкция ковочного пресса "UNITED" силой 20 МН 20

Прокатно-волочильное производство

Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Моделирование кинематики течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083 26
Мышечкин А.А., Минин А.В. Опыт производства стальной проволоки для производства метизных изделий 32

Материаловедение и новые материалы

Пучков Ю.А., Фам Хонг Фу. Влияние режимов охлаждения при закалке на структуру и свойства сплавов системы Al—Mg—Si 37
Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А. Исследование шероховатости и толщины теплозащитных покрытий для заготовок из никелевых сплавов 42

Информация

Леушин И.О., Грачёв А.Н., Маслов К.А., Леушина Л.И., Моисеев Д.О. К вопросу о дегазации свинцовой литейной латуни марки ЛЦ40Сд 47

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

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

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

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

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

№ 4 April 2016

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

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

Journal is registered by Ministry of Telecom and Mass Communications of the Russian Federation. The certificate of registration ПИ № ФС 77-63952, December 9, 2015.

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Zhizhkina N.A. Development of secondary treatment technology of high-alloy cast iron melt for working layer of centrifugaly casting rolls 3
Ovchinnikov V.V., Drits A.M., Kurbatova I.A., Gureeva M.A. Technological aspects of surface preparation of wrought aluminum alloys to arc welding 7

Forging and Stamping Production

Sobolev Ya.A., Chudin V.N., Kuznetsov M.V. Three-layer hull stringer panels forming 16
Goydo M.E., Bodrov V.V., Bagautdinov R.M., Shnaider L.B. Reconstruction of forging press "UNITED" force of 20 MN 20

Rolling and Drawing Production

Pesin A.M., Pustovoytov D.O. Modeling of kinematics of metal flow during asymmetric sheet rolling of aluminum alloy 5083 26
Myshechkin A.A., Minin A.V. Experience in production of steel wire for manufacture of handware items 32

Physical Metallurgy and New Materials

Puchkov Yu.A., Pham Hong Phu. Effect of cooling regimes on structure and properties of heat treatable Al—Mg—Si alloys 37
Petrov A.N., Loginov B.A., Petrov M.A. Study of roughness and thickness of thermal protective coatings applied for workpieces made from Ni-based alloys 42

Information

Leushin I.O., Grachev A.N., Maslov K.A., Leushina L.I., Moiseev D.O. On question of degassing of leaded cast brass CuZn40Pb2 47

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

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

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

УДК 621.74.02

Н.А. Жижкина
(Брянский государственный технический университет)

Разработка технологии внепечной обработки расплава высоколегированного чугуна для рабочего слоя центробежно-литых валков

Описана технология внепечной обработки расплава высоколегированного чугуна для рабочего слоя центробежно-литых валков. Предложен компактированный реагент для рафинирования расплава от вредных примесей. Как результат его применения в исследуемом чугуне снизились доля серы в 2 раза и количество неметаллических включений — в 1,45 раза. Разработанная технология включала в себя принудительное перемешивание жидкого металла азотом. Это позволило повысить однородность состава, структуры и уровня свойств рабочего слоя валков.

Ключевые слова: высоколегированный чугун; азот; компактированный реагент; рафинирование; центробежно-литой валок.

The secondary treatment technology of high-alloy cast melt iron for working layer of centrifugally cast rolls is considered. Compacted reagent for refining of the melt contaminants is proposed. Sulphur content by 2 times and non-metallic inclusions quantity by 1.45 times are decreased in the researches iron as result of its use. The developed technology included the forced mixing of the liquid metal by nitrogen. It allowed to increase the homogeneity of the composition, structure and properties level of working layer of rolls.

Keywords: high alloyed cast iron; nitrogen; compacted reagent; refining; centrifugal casting roll.

Одним из актуальных направлений развития производства горячекатанного листа является повышение эксплуатационной стойкости валков, основной показатель которой — сопротивление к износу — определяет скорость и точность работы прокатного стана.

Для повышения износостойкости рабочей поверхности листопрокатных валков до 20 т разработаны различные составы сложнолегированных чугунов [1, 2]. Изготовление листопрокатных валков из таких материалов в [3] предложено осуществлять путем центробежного литья в вертикально вращающиеся формы. Разработанная технология включает в себя различные методы доводки расплавов вне печи. Однако их применение ограничено содержанием вредных примесей в подготовляемом расплаве, основными из которых являются соединения кислорода и серы [4].

Для очищения расплавов от неметаллических включений, вносимых в металл (экзогенных) и образуемых в нем (эндогенных), разработаны различные приемы, проводимые непосредственно в плавильном агрегате или вне его. Печные методы, заключающиеся в использовании вместо топливного агрегата электрического (электродугового, индукционного) или проведении дуплекс-процесса плавления, снижают преимущественно количество экзогенных неметаллических частиц.

Для очищения сложнолегированных чугунов от эндогенных включений разработаны внепечные методы, заключающиеся во введении различных рафинирующих добавок в ковш с жидким чугуном. Соединяясь с вредными примесями (кислородом, серой), растворенными в валковом расплаве, реагенты снижают вязкость и температуру плавления образуемого шлака, что ускоряет химические реакции в нем, а следовательно, интенсифицирует вывод неметаллических включений из жидкого чугуна [4].

Цель работы — разработка технологии внепечной обработки расплава высоколегированного чугуна для рабочего слоя центробежнолитых валков.

В промышленных условиях провели экспериментальные исследования внепечного рафинирования хромоникелевого чугуна (3,00...3,30 % C; 0,60...0,80 % Si; 0,50...0,70 % Mn; не более 0,10 % P; до 0,02 % S; 1,40...1,60 % Cr; 4,2...4,4 % Ni), используемого в качестве рабочего слоя листопрокатных валков.

Эффективность исследуемых рафинирующих добавок оценивали по изменению содержания серы в составе анализируемого чугуна и количества неметаллических включений в его структуре согласно стандартным методикам.

Установлено, что введение в жидкий чугун различных смесей активных компонентов (известь, плавиковый шпат, карбид кальция, кальцинированная сода) позволило снизить содержание серы на 11 %, а обработка расплава азотом [5] — на 23...25 % по сравнению с ее первоначальным содержанием.

Снижение содержания серы в составе исследуемого сплава в 2 раза и количества неметаллических включений в его структуре на 40 % по сравнению с исходным металлом получено в результате обработки расплава смесью карбида кальция и кальцинированной соды с последующим вдуванием азота. Вместе с тем выявлено, что данный способ внепечного рафинирования недостаточно эффективен для валковых расплавов с исходным содержанием серы более 0,04 %. Снижение содержания серы до 0,02 % в таких расплавах обеспечивает внепечная обработка жидкого чугуна магниевой лигатурой (сплавом с железом, кремнием и кальцием), основным назначением которой является модифицирование [6]. Однако в структуре рабочего слоя экспериментальных отливок наблюдались скопления неметаллических включений вокруг графита в виде черных пятен — дефекта, снижающего эксплуатационные показатели валков.

Для получения высоколегированного чугуна с минимальными показателями содержания серы в его составе и количества неметаллических включений в структуре (рис. 1) предложено использовать компактированный реагент, состоящий из магниевой лигатуры, карбида кальция CaC_2, кальцинированной соды Na_2CO_3 и плавикового шпата CaF_2.

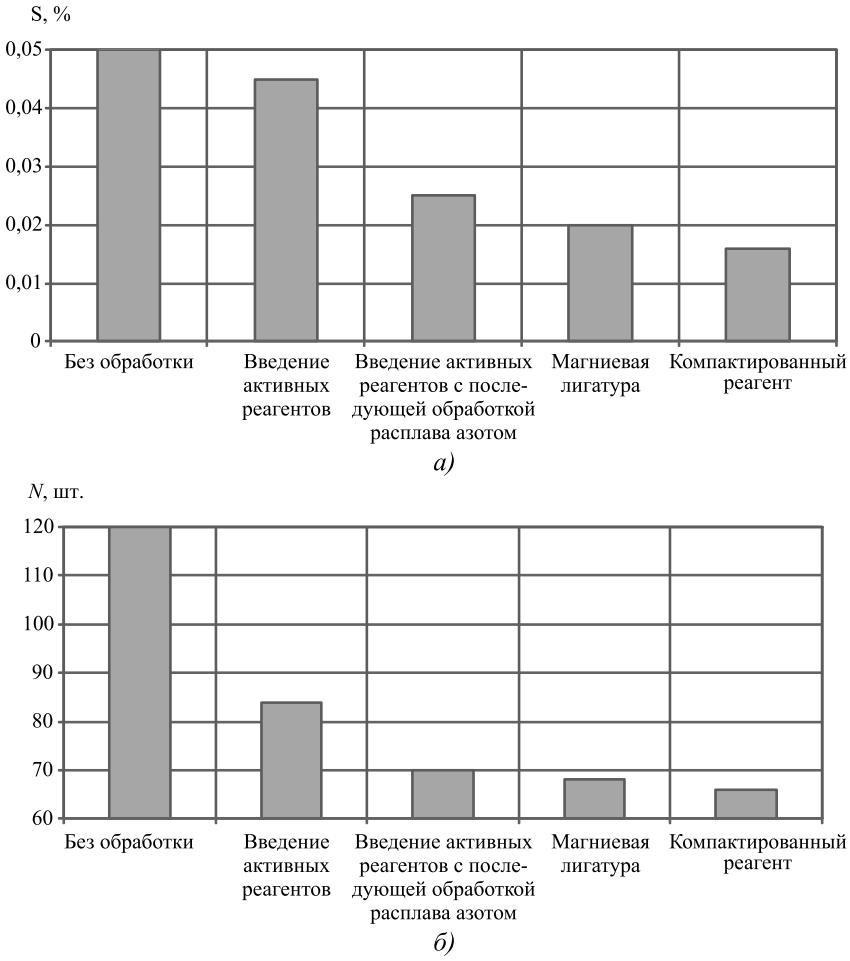
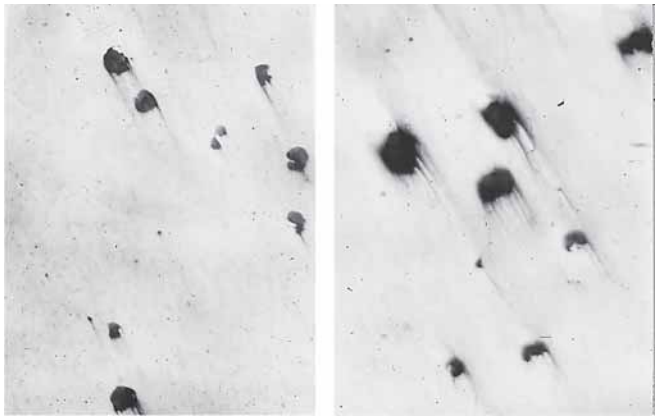
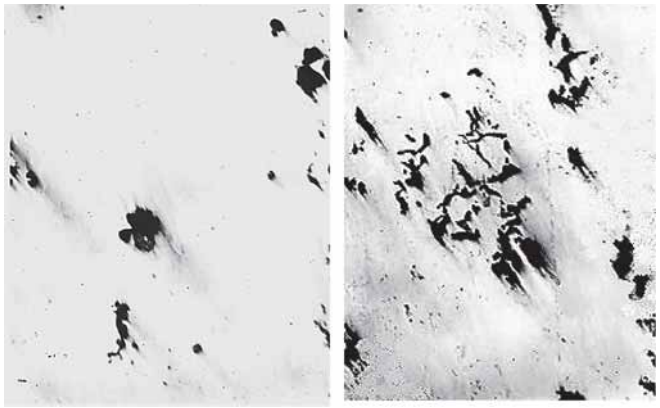


Рис. 1. Изменение содержания серы в составе (*а*) и количества неметаллических включений в структуре (*б*) хромоникелевого чугуна в зависимости от метода его внепечной обработки



а) *б)*

Рис. 2. Распределение неметаллических включений и графита на поверхности (*а*) и глубине 30 мм (*б*) рабочего слоя валка, чугун для которого обработан предлагаемым компактированным реагентом (14 кг на 1 т жидкого металла). Не травлено. ×100



а) *б)*

Рис. 3. Распределение неметаллических включений и графита на поверхности (*а*) и глубине 20 мм (*б*) рабочего слоя валка, чугун для которого обработан Si—Ca—Mg-лигатурой (14 кг на 1 т жидкого металла). Не травлено. ×100

Компактированный реагент показал наибольший модифицирующий эффект по сравнению с ранее рассмотренными реагентами. При внепечной обработке жидкого чугуна компактированным реагентом в его структуре наблюдали шаровидный графит правильной формы (ШГф5). В то время как при введении в расплав такой же массы магниевой лигатуры — компактный и вермикулярный графит (рис. 2, 3).

Анализ структуры по глубине образцов выявил большое количество неравномерно распределенных по глубине графитовых включений, что оказало влияние на ресурс работоспособности прокатного инструмента. Установлено, что при их неравномерном распределении в структуре хромоникелевого чугуна увеличилась величина съема рабочего слоя валков при перетачиваниях между установками в клеть (табл. 1).

Для одновременного снижения количества неметаллических частиц и более равномерного распределения графитовых включений в структуре рабочего слоя жидкий чугун обрабатывали компактированным реагентом с последующим принудительным перемешиванием расплава азотом в ковше.

Согласно предложенной технологии в подогретый ковш с помещенным в специальное углубление компактированным реагентом выпускали из печи металл при температуре не ниже 1450 °С. После окончания реакции растворения компактированного реагента в чугуне счищали шлак с поверхности расплава, контролировали его температуру контактной термопарой.

Затем над разливочным ковшом устанавливали устройство, разработанное для внепеч-

1. Изменение величины съема при перетачивании в зависимости от распределения графитовых включений в рабочем слое исследуемых валков

Условный номер валка	Графит				Величина съема за одну установку, мм
	Форма	Размер, мкм	Распределение	Количество, %	
1	ШГф5	ШГд45	ШГр2	ШГ2	0,43
2	ШГф5	ШГд25, ШГд45	ШГр2	ШГ4	0,46
3	ШГф5	ШГд25, ШГд45	ШГр2	ШГ1	0,53
4	ШГф5	ШГд45	–	Единичные включения	0,33

Примечание. Включения графита оценивали согласно ГОСТ 3443—87.

2. Распределение химических компонентов по глубине рабочего слоя из исследуемого чугуна

Глубина, мм	Содержание химических компонентов, % мас.			
	Si	Mn	Cr	Ni
Поверхность	0,78	0,66	1,56	4,26
15	0,78	0,62	1,58	4,26
20	0,70	0,60	1,52	4,26
30	0,75	0,60	1,52	4,30
40	0,70	0,64	1,52	4,32

3. Изменение твердости по Шору HSD рабочего слоя исследуемого валка

Место отбора	Глубина измерений, мм					
	5	10	15	20	25	30
Верхний торец бочки	78	78	78	77	74	74
Нижний торец бочки	78	78	78	77	76	76

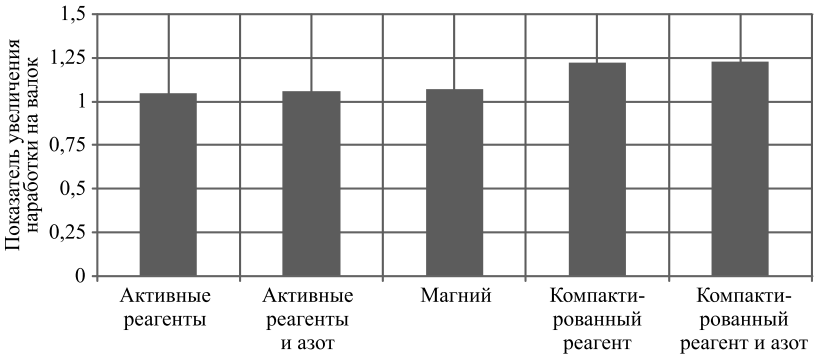


Рис. 4. Влияние способа обработки хромоникелевого чугуна для рабочего слоя листопрокатных валков на увеличение их наработки

ной обработки жидкого металла азотом. С его помощью путем принудительного перемешивания проводили усреднение состава жидкого металла в объеме ковша. В результате рабочий слой экспериментальных валков характеризовался равномерным содержанием химических компонентов по глубине всего изделия (табл. 2). Разница в показаниях их содержания составила 0,4...0,8 %, что не превысило погрешности измерений.

При перемешивании расплава атомарный азот, обладая повышенной химической активностью, растворяется в железе, что повышает стабильность образуемых в хромоникелевом чугуне карбидов. Вследствие этого рабочий слой характеризовался более высоким и стабильным уровнем твердости (табл. 3), что оказало положительное влияние на эксплуатацию прокатного инструмента. В результате использования предлагаемого способа внепечной обработки хромоникелевого чугуна наработка валков повысилась в 1,23 раза (рис. 4).

Заключение. В результате разработанной технологии внепечной обработки жидкого металла по сравнению с известными методами снизились доля серы в его составе до менее 0,02 % (при исходном ее содержании 0,05 %), количество неметаллических включений на 45 % по сравнению с неочищенным металлом. При этом повысилась однородность состава сложнолегированного чугуна, а следовательно, структуры и уровня свойств, что гарантировало рост эксплуатационных показателей валков: наработка увеличилась более чем на 20 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Жижкина Н.А., Ипатов С.А.** Анализ особенностей строения чугунов различного состава // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 1. С. 20—24.

2. **Пат. 91288 Україна, МПК (2014) С 22 С 38/22, С 22 С 38/24, С 22 С 38/46.** Чавун.

3. **Пат. 2148471 РФ, МКИ 7 В 22 D 13/02.** Способ центробежного литья двухслойных прокатных валков с рабочим слоем из высоколегированного чугуна. 2000.

4. **The refining** of rolls metal of non-metallic inclusions during centrifugal casting / Nataliya Zhizhkina, Nicolay Budagyants, Yuriy Gutko // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture (Poland), 2010. V. XD. P. 73—79.

5. **Пат. 74969 Україна, МПК (2006) С 21 С 7/00, С 21 С 7/072.** Пристрій для позапічної обробки рідкого металу.

6. **Теоретическое** обоснование модифицирования высокопрочного чугуна как способа измельчения графитовой фазы / К.В. Макаренко, А.А. Тарасов, Н.А. Жижкина, Е.А. Зенцова // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 4. С. 3—9.

Наталья Александровна Жижкина, канд. техн. наук,
litjo_snu@mail.ru

УДК 621.791.02

В.В. Овчинников, А.М. Дриц*, И.А. Курбатова, М.А. Гуреева
(Московский государственный машиностроительный университет "МАМИ",
** ЗАО "Алкоа Самарский металлургический завод")*

Технологические аспекты подготовки поверхности деформируемых алюминиевых сплавов под дуговую сварку

Представлены результаты исследований влияния метода подготовки поверхности свариваемых деформируемых алюминиевых сплавов к дуговой сварке. Показано, что наиболее оптимальным методом подготовки поверхности алюминиевых сплавов под дуговую сварку является термовакуумная обработка и высокоскоростное фрезерование. Установлено, что структура и толщина оксидных пленок определяются химическим составом сплава и методом подготовки.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; поверхность; оксидные пленки; газовыделение; фрезерование; химическое травление; термовакуумная обработка.

The researches results of influence of surface preparation method of welded wrought aluminum alloys to arc welding are presented. It is shown that the optimal method of surface preparation of aluminum alloys under arc welding is thermal vacuum processing and high-speed milling. It is founded that the structure and the thickness of the oxide films are defined by the chemical composition of the alloy and method of preparation.

Keywords: aluminum alloys; surface; oxide films; outgassing; milling; chemical pickling; thermal vacuum processing.

Введение. Опыт изготовления сварных конструкций из деформируемых алюминиевых сплавов показал, что многие дефекты в сварных швах обусловлены состоянием их поверхности. Под состоянием поверхности понимается микрогеометрия поверхности, наличие оксидных (или пассивных) пленок, а для сплавов систем Al—Mg—Li, Al—Mg—Cu—Li, Al—Cu—Li — тонкого поверхностного слоя толщиной 0,1...0,15 мм.

Для получения высококачественных сварных соединений необходимо иметь достоверные качественные и количественные данные о содержании газов и влаги на поверхности свариваемых деталей.

Большое практическое значение имеет изучение кинетики изменения содержания газов и влаги на поверхности в процессе хранения деталей перед сваркой. На основании этих данных помимо выбора оптимального метода подготовки регламентируют требования к помещениям, где хранят, собирают и сваривают изделия. Существующие в настоящее время рекомендации носят иногда противоречивый характер и не учитывают специфику новых деформируемых алюминиевых сплавов. Кроме того, в специальной технической литературе отсутствуют рекомендации по подготовке поверхности применительно к условиям длительного цикла сборки—сварки конструкций.

В статье приведены результаты исследования влияния различных способов подготовки поверхности на качество сварных соединений новых деформируемых алюминиевых сплавов. Особое внимание уделено возможности стабилизации свойств поверхности при сварке крупногабаритных изделий с длительным циклом сборки—сварки.

Методика проведения экспериментов. В рамках исследований были опробованы механические, химические, термические и комбинированные способы подготовки поверхности. Микрогеометрию поверхности образцов после различных способов подготовки определяли на приборе "Калибр-ВЭИ" с вертикальным увеличением от 1000 до 10 000 и горизонтальным до 80.

Для определения характеристик поверхности образцов из алюминиевых сплавов применяли термодесорбционный масс-спектро-

метрический метод. Процесс газовыделения с поверхности исследовали на установке для вакуумного нагрева с индукционной печью, принципиальная схема которой приведена в работе [1], и на установке для нагрева поверхности лучом лазера по методике работы [2]. В процессе нагрева выделяющиеся газы постоянно прокачивали через датчик масс-спектрометра, с помощью которого регистрировали масс-спектр в диапазоне m/e = 1...60.

Для исследования влияния нагрева на состояние подготовленной поверхности применяли муфельную электрическую печь, оснащенную дополнительным контейнером из стали 12Х18Н10Т, в который в процессе нагрева через трубку из баллона подавался аргон.

Для сварки образцов по целой пластине и стыковых соединений исследуемых алюминиевых сплавов применяли установку для аргонодуговой сварки на базе автомата АДСВ-7.

Все образцы после сварки подвергали рентгеновскому контролю на наличие дефектов в виде пор и несплошностей. Выявленные дефектные участки дополнительно исследовали методами металлографии.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В табл. 1 приведены результаты исследований. Видно, что от метода подготовки поверхности значительно зависит ее микрогеометрия. Особенно резко она ухудшается после зачистки щеткой и химического фрезерования (так, максимальная высота микровыступов увеличивается в 4—9 раз по сравнению с исходной). В то же время механическая обработка (высокоскоростное фрезерование) на станках обеспечивает минимально возможную высоту микровыступов, что приводит к минимальной суммарной площади поверхности и уменьшает количество адсорбированной влаги и газов.

Во всех случаях подготовки поверхности следует стремиться к обработке торцев свариваемых деталей высокоскоростными фрезерными головками со специальным инструментом непосредственно перед сборкой под сварку. Такую возможность обеспечивают только установки типа УПСФ, где подготовка поверхности, сборка и сварка осуществляются на одном рабочем месте с одного установа и по единой программе с минимальным разрывом во времени [3]. При этом отпадает необходимость операции шабрения перед сваркой.

Применительно к выделению водорода для всех исследованных сплавов установлено наличие трех типов спектра: первый — в диапазоне температур нагрева 200...300 °С, второй — 450...550 °С и третий — 650...700 °С. По-видимому, выделение водорода при 200...300 °С происходит из влаги, адсорбированной на поверхности, а при 450...550 °С — из гидроксидов AlOH, LiOH, MgOH. При 650...700 °С наблюдается выделение водорода, растворенного в исследуемом металле.

Экспериментальные данные о влиянии различных методов обработки поверхности алюминиевых сплавов на общее газовыделение и, в частности, на содержание адсорбированной на поверхности влаги приведены на рис. 1—3.

1. Влияние метода подготовки поверхности алюминиевых сплавов на высоту микровыступов

Метод подготовки поверхности	Высота микровыступов, мкм, для сплавов					
	АМг6	1565ч	1201	1420	1460	В-1469
Состояние поставки после обезжиривания	1...1,5	0,9...1,2	0,8...1,5	1,3...2,9	0,9...2,4	1,1...2,6
Химическое травление	2,1...3,5	1,9...2,7	2,0...3,1	2,8...4,4	2,2...3,8	2,5...3,9
Химическое полирование	1,2...1,7	1,1...1,5	0,9...1,6	1,9...3,2	1,5...2,7	1,3...2,6
Химическое фрезерование	4,5...6,0	3,9...5,5	4,9...6,2	6,1...7,5	5,4...7,2	5,1...6,9
Механическая обработка (фрезерование на режимах 750...2000 мин$^{-1}$)	2,0...3,5	1,8...2,9	2,0...3,0	2,5...4,0	2,0...3,5	1,6...3,1
Механическая обработка (фрезерование на высокоскоростных режимах 5000...10 000 мин$^{-1}$)	1,2...1,3	1,1...1,4	1,2...1,3	1,3...1,5	1,2...1,5	1,3...1,4
Химическое травление + термовакуумная обработка	2,1...3,4	1,9...3,1	2,0...3,0	3,1...4,4	2,6...4,2	2,1...3,7
Зачистка вращающейся металлической щеткой	8,2...16,4	7,5...13,5	6...14	7,5...16	6,8...15,4	8,2...12,7

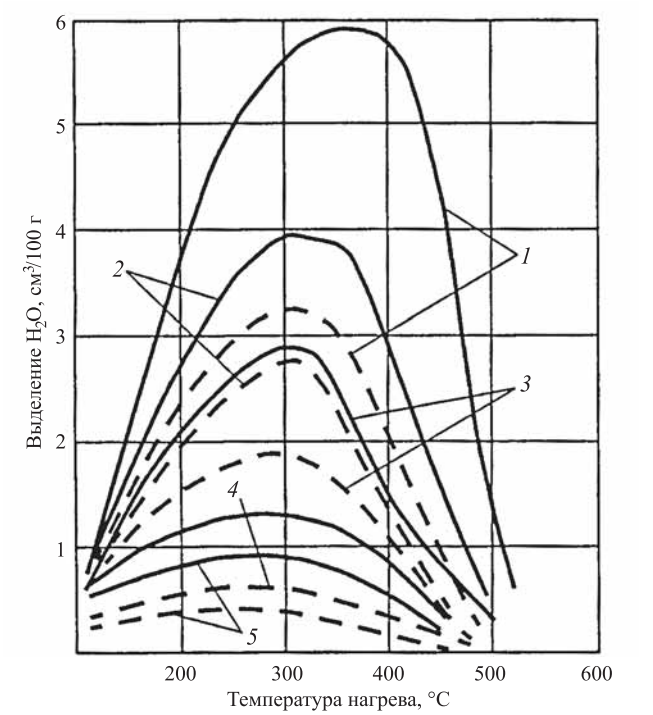


Рис. 1. Характер десорбции влаги с поверхности сплавов 1565ч (сплошная линия) и 1201 (штриховая) после обезжиривания бензином (*1*), химического травления (*2*), химического (*3*) и скоростного (*4*) фрезерования, термовакуумной обработки (*5*)

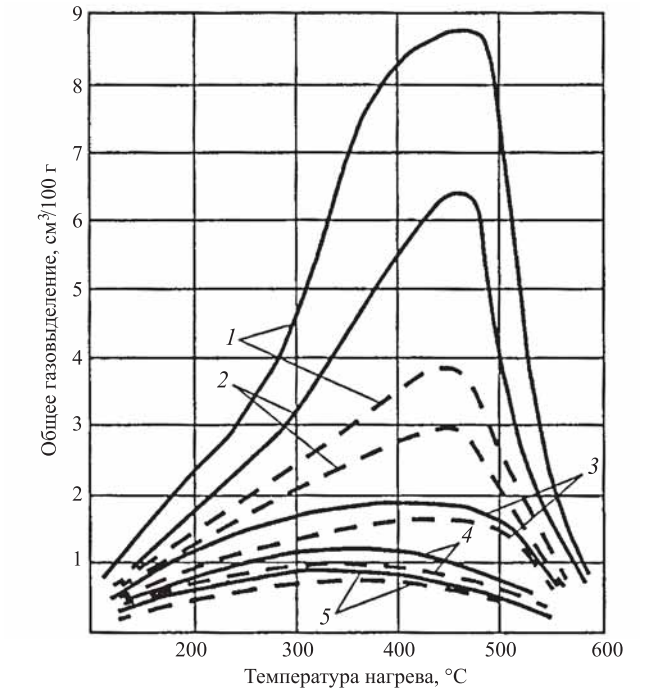


Рис. 2. Характер изменения общего газовыделения с поверхности сплавов В1469 (сплошная линия) и В1341 (штриховая):

1—5 — см. рис. 1

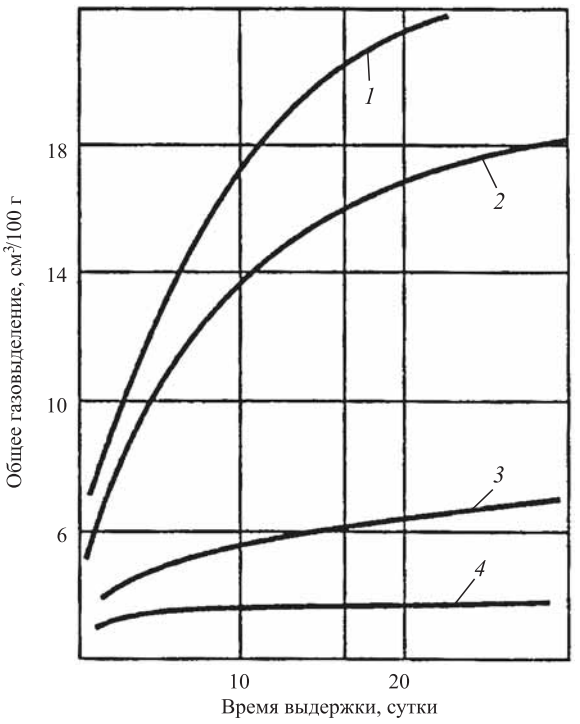


Рис. 3. Зависимость общего газовыделения образцов после химического травления от времени выдержки во влажной атмосфере (100%-ной относительной влажности):

1 — сплав 1420; *2* — 1565ч; *3* — 1201; *4* — В1341

Кривые газовыделения с поверхности образцов из сплавов 1565ч и 1201 показали (см. рис. 1), что методы подготовки поверхности существенно влияют на общее газовыделение и, в частности, на количество адсорбированной влаги. Например, такие методы подготовки поверхности, как химическое травление и фрезерование, скоростное фрезерование и *термовакуумная обработка* (ТВО) снижают количество адсорбированной влаги соответственно в 1,4; 2,2; 3,6 и 9,3 раза по сравнению с состоянием поставки и при обезжиривании ацетоном (бензином).

Применительно к сплавам В1341 и В1469 общее газовыделение с поверхности также определяется методом ее подготовки. Скоростное фрезерование и ТВО снижают общее газовыделение примерно в 7—10 раз (см. рис. 2).

Выдержка образцов после различных способов подготовки до сварки также заметно влияет на газовыделение с поверхности. Согласно анализу кривых газовыделения (см. рис. 3) абсолютные показатели зависят от марки сплава. Для сплавов 1420, 1565ч, 1201 и В1341 после выдержки в течение 10...15 суток во влажной атмосфере общее газовыделение увеличивается соответственно в 2,9; 2,3; 1,3 и 1,04 раза.

2. Структура и толщина оксидных пленок на алюминиевых сплавах в зависимости от метода подготовки поверхности

Марка сплава	Метод подготовки поверхности	Структура оксидных пленок	Толщина пленки, мм	
			отдельных составляющих	общая
АМг6	Состояние поставки	MgO	0,005...0,15	0,020...0,45
		$MgO + Al_2O_3$	0,015...0,03	
	Химическое травление	MgO	0,003...0,01	0,013...0,35
		$MgO + Al_2O_3$	0,01...0,025	
	ТВО	Al_2O_3+ MgO	0,015...0,026	0,015...0,026
1565ч	Состояние поставки	MgO	0,002...0,12	0,025...0,40
		(ZnO, MgO) + Al_2O_3	0,018...0,035	
	Химическое травление	MgO	0,002...0,012	0,013...0,38
		$MgO + Al_2O_3$	0,01...0,028	
	ТВО	Al_2O_3+ MgO	0,012...0,020	0,012...0,020
1201	Состояние поставки	Al_2O_3	0,007...0,017	0,007...0,017
	Химическое травление		0,005...0,014	0,005...0,014
	ТВО		0,003...0,01	0,003...0,01
В1341	Состояние поставки	MgO	0,002...0,11	0,015...0,38
		$MgO + Al_2O_3$	0,01...0,020	
	Химическое травление	MgO	0,002...0,008	0,010...0,27
		$MgO + Al_2O_3$	0,01...0,020	
	ТВО	Al_2O_3+ MgO	0,011...0,020	0,011...0,020
1420	Состояние поставки	Li_2O + LiOH	0,004...0,007	0,10...0,36
		MgO	0,009...0,013	
		$MgO + Al_2O_3$	0,02...0,05	
		Al_2O_3	0,002...0,005	
	Химическое травление	Li_2O + LiOH	0,002...0,005	0,070...0,28
		MgO	0,01...0,014	
		$MgO + Al_2O_3$	0,012...0,05	
		Al_2O_3	0,002...0,006	
	ТВО	Al_2O_3+ MgO	0,012...0,024	0,012...0,024
1460	Состояние поставки	Li_2O + LiOH	0,002...0,005	0,05...0,17
		$Li_2O + Al_2O_3$	0,008...0,012	
		Al_2O_3	0,003...0,009	
	Химическое травление	Li_2O + LiOH	0,004...0,01	0,03...0,15
		$Li_2O + Al_2O_3$	0,006...0,011	
		Al_2O_3	0,003...0,009	
	ТВО	Al_2O_3	0,01...0,02	0,01...0,02

Окончание табл. 2

Марка сплава	Метод подготовки поверхности	Структура оксидных пленок	Толщина пленки, мм	
			отдельных составляющих	общая
В1469	Состояние поставки	Li_2O + LiOH	0,001...0,003	0,05...0,11
		Li_2O +Al_2O_3	0,006...0,010	
		Al_2O_3	0,002...0,008	
	Химическое травление	Li_2O + LiOH	0,001...0,002	0,03...0,07
		Li_2O +Al_2O_3	0,004...0,009	
		Al_2O_3	0,002...0,006	
	ТВО	Al_2O_3	0,01...0,02	0,01...0,02

Такая разница в значениях определяется только спецификой структурного строения оксидных пленок и их толщиной на разных сплавах.

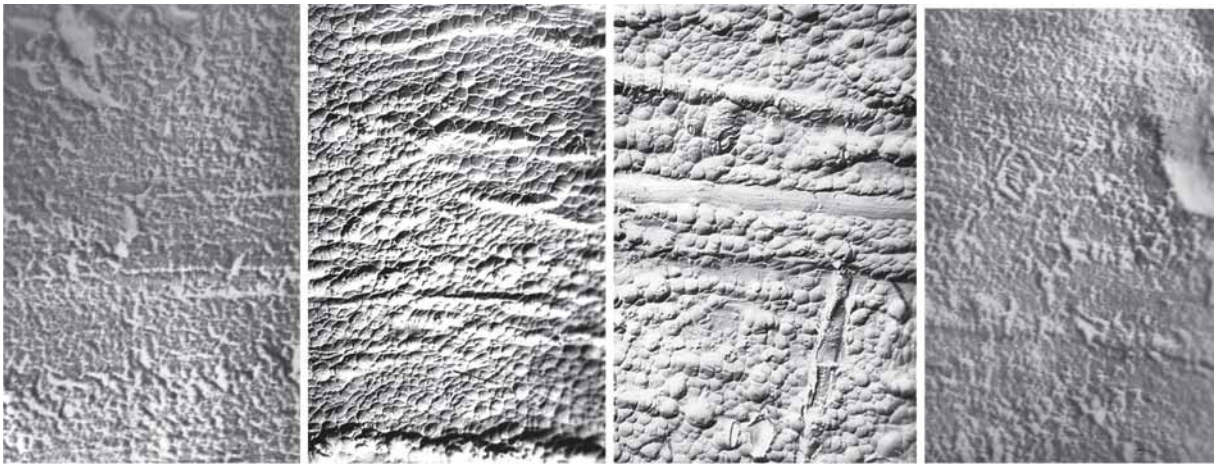
Установлено (табл. 2), что структура и толщина оксидных пленок на поверхности резко отличаются и определяются химическим составом сплавов и методом подготовки.

Микрорельеф поверхности образцов сплава 1565 при большом увеличении в исходном состоянии и после химического травления представлен на рис. 4.

Методы подготовки поверхности, условия и длительность хранения деталей после подготовки под сварку значительно влияют на газосодержание поверхности. Для обеспечения высококачественных сварных соединений необходимо строго регламентировать атмосферные условия в цехах сборки—сварки. Относительная влажность не должна превышать 60...65 %, температура (23 ± 2) °С. Для предотвращения запыления воздуха целесообразно поддерживать в цехе избыточное давление 20...30 МПа. С учетом данных рис. 1—3 и табл. 1, 2 основное внимание было уделено ТВО как перспективному методу подготовки поверхности под сварку.

Ранее ТВО исследовали только применительно к сплаву 1420. Однако ТВО можно применять как способ подготовки поверхности для всех деформируемых алюминиевых сплавов.

В данной работе ТВО исследовали на образцах сплавов толщиной 2,0 и 3,0 мм. Обработку осуществляли в вакуумной печи СНВА1,3.1 при остаточном давлении 0,13 Па. Перед вакуумной обработкой проводили



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 4. Микрорельеф поверхности алюминиевого сплава 1565 (×10 000):

а — исходная структура; *б* — травление в щелочи 5 мин; *в* — травление в щелочи 10 мин; *г* — травление в щелочи и осветление в азотной кислоте 60 с

обезжиривание и химическое травление. Температуру ТВО изменяли от 150 до 550 °С, время выдержки — от 1 до 8 ч. Критерием оценки подготовки поверхности после ТВО служили общее газовыделение с поверхности или по отдельным газовым составляющим (H_2, H_2O, CO, CO_2, C_xH) и результаты рентгеновского просвечивания сварных соединений.

Результаты исследования газовыделения с поверхности образцов в зависимости от способа подготовки показали, что после ТВО для всех исследованных сплавов систем Al—Mg (АМг6), Al—Mg—Li (1420, 1421, 1423, 1424), Al—Cu—Mg (М40, 1150, 1151, 1153), Al—Cu—Mg—Li (1440, 1450, 1451, 1460, В1461, В1469), Al—Mg—Si (АВ, В1341) и Al—Cu—Mn (1201, 1205) отмечается резкое уменьшение общего газовыделения и отдельных его составляющих (от 2 до 9 раз по сравнению с традиционными способами подготовки поверхности). Это, по-видимому, связано со значительными изменениями строения поверхностного слоя после ТВО.

Были проведены исследования изменения состава приповерхностного слоя на поверхности листов в зависимости от марки сплава и метода подготовки поверхности. Для определения фазового состава при окислении образцов в твердом состоянии оксидную пленку удаляли с поверхности и снимали рентгенограммы. В целях повышения достоверности полученных данных для анализа фазового состава оксидных пленок использовали Оже-спектрометр RHI 680 AES фирмы Physical Electronics (см. табл. 2).

Анализ фазового состава оксидных пленок на сплавах АМг6 и 1565ч показал, что они состоят из оксида магния. Слои пленки, прилегающие к основе сплава, содержат магниевую шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$. Толщина данной пленки составляет 0,02...0,045 мм. После ТВО по оптимальным режимам структура и толщина оксидной пленки существенно изменяются. Она состоит практически из оксида алюминия Al_2O_3.

Оксидная пленка на сплаве 1201 состоит из γ-модификации Al_2O_3 с увеличенным параметром кристаллической решетки вследствие присутствия двухвалентных катионов меди. После ТВО оксидные пленки не изменяются по составу и толщине. Оксидная пленка на сплавах типа 1420 состоит из Li_2O, который, взаимодействуя на воздухе с углекислым газом и парами воды, превращается в LiOH и Li_2CO_3. Кроме лития окисляются магний и алюминий с образованием MgO и Al_2O_3. Толщина оксидной пленки в 7—9 раз больше, чем на сплавах типа 1201 и в 1,5—2 раза больше, чем на сплавах типа АМг6.

После ТВО по оптимальным режимам фазовый состав оксидной пленки значительно изменяется и практически состоит из Al_2O_3 и MgO, а толщина пленки уменьшается в 2—3 раза.

Оксидная пленка на сплаве В1341 состоит из γ-модификации Al_2O_3 с увеличенным параметром кристаллической решетки вследствие присутствия двухвалентных катионов кремния. После ТВО толщина оксидной пленки и ее состав на сплаве В1341 не изменяются.

Оксидная пленка на сплавах типа 1460 (В1461 и В1469) состоит в основном из Li_2O, который взаимодействует с углекислым газом и парами воды с образованием LiOH и Li_2CO_3. Толщина оксидной пленки в состоянии поставки 0,013...0,03 мм. После ТВО фазовый состав оксидной пленки изменяется и практически состоит из Al_2O_3, а толщина пленки уменьшается в 1,5—2 раза.

Установлено, что ТВО изменяет структуру и толщину оксидных пленок у большинства исследованных сплавов. Степень этого изменения определяется в максимальной степени системой легирования сплава. Наибольшие изменения отмечаются на сплавах систем Al—Mg, Al—Mg—Zn, Al—Mg—Li, Al—Cu—Li, Al—Cu—Mg, в то время как на сплавах системы Al—Cu—Mn они небольшие.

Это обусловлено удалением (сублимацией) с поверхности деталей легирующих элементов — лития и магния, так как упругость их паров при 400...550 °С намного превосходит упругость паров алюминия. Причем такое состояние сохраняется длительное время. Так, на образцах из сплавов 1420, 1421, 1423, 1424 и В1469 после ТВО и выдержки на воздухе в течение 1...4, 6, 9 и 12 месяцев не обнаружили склонности к образованию пористости при сварке. В то же время на образцах из этих же сплавов с удаленным механическим или химическим путем поверхностным слоем после выдержки в течение 15...25 суток наблюдается интенсивная пористость после сварки в металле шва (рис. 5).

Таким образом, образующийся после ТВО поверхностный слой, обедненный реакционно-

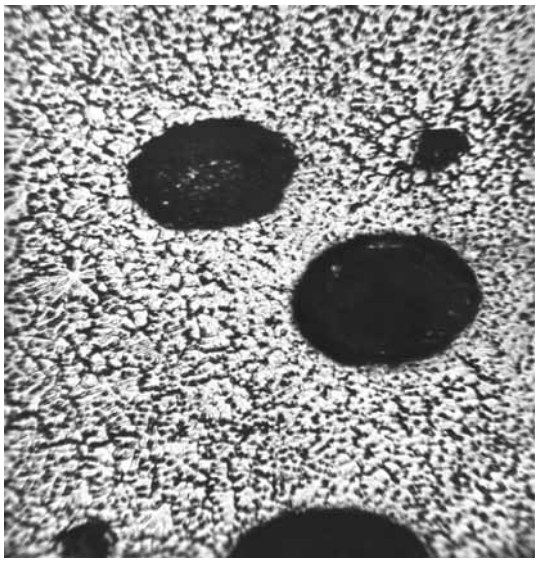


Рис. 5. Пористость в металле шва сплава 1565ч при подготовке под сварку химическим методом с выдержкой перед сваркой в течение 25 суток. ×100

способными элементами (например, литием и магнием), толщиной 60...100 мкм (по данным металлографии, рис. 6) длительное время (до 1 года и более) предохраняет поверхность от взаимодействия с атмосферой. Наблюдаемая толщина обедненного слоя при ТВО хорошо согласуется с расчетными данными, основанными на температурной зависимости коэффициента диффузии лития и магния в алюминий.

С другой стороны, после контролируемого удаления поверхностного слоя (механическим или химическим путем) активность поверхности не снижается, обедненный слой не образуется, поэтому сразу после подготовки поверхности начинают происходить топохимические реакции с парами воды, CO и CO_2, содержащимися в атмосфере.

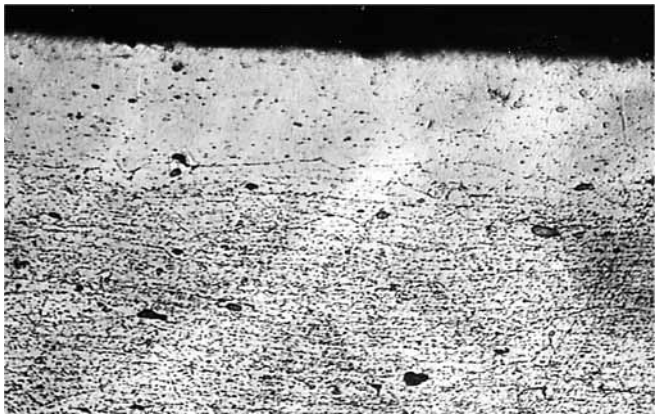


Рис. 6. Микроструктура поверхностного слоя на сплаве 1420 после термовакуумной обработки. ×200

Проведение ТВО требует обязательного применения вакуумного оборудования с большими габаритными размерами рабочих камер, поэтому дополнительно исследовали влияние нагрева на воздухе и в аргоне на процесс порообразования в сварных швах.

Установили, что высокотемпературный нагрев на воздухе сплавов АМг6, 1565ч, 1420, 1421, 1460, В1469 приводит к обеднению приповерхностного слоя магнием и литием благодаря окислению этих элементов и сублимации. После нагрева на поверхности образуется рыхлая пленка темно-серого цвета. Рентгеноструктурный анализ показал, что в ее состав входят LiO_2, Li_2CO_3, LiOH и MgO. После удаления этой пленки химическим травлением на сварных образцах обнаруживается интенсивная пористость.

При проведении локального газового анализа на содержание водорода было установлено, что с увеличением температуры и времени нагрева общее содержание водорода скачкообразно возрастает. Так, например, содержание водорода в поверхностном слое глубиной около 100 мкм после нагрева при 500 °С в течение 3 ч увеличивается в 4,5—5,8 раза по сравнению с исходным (сплав 1420 толщиной 3,0 мм).

Таким образом, при нагреве на воздухе происходит обеднение легирующими элементами приповерхностного слоя, так же как и при ТВО, однако пористость при сварке возникает из-за резкого повышения концентрации водорода в приповерхностном слое. Поэтому этот метод подготовки поверхности использовать нельзя.

В связи с этим исследовали возможность нагрева в среде инертных газов (в аргоне) как способ подготовки поверхности под сварку. Образцы из сплавов АМг6, 1565ч, В1341, 1420, 1421 и 1460 после стандартного химического травления помещали в контейнер из стали 12Х18Н10Т, заваривали его, наполняли через вводную трубку аргоном и помещали в печь.

После нагрева на поверхности образцов наблюдается серый порошкообразный налет, который удаляют волосяными щетками, смоченными теплой водой. Сварка непосредственно после нагрева в аргоне и удаления налета приводит к образованию небольшой пористости. После стандартного химического травления поры на рентгенограммах не наблюдали. Таким образом, нагрев до сварки в инертном

газе, так же как и ТВО, обеспечивает получение качественных сварных соединений без пор, однако требует дополнительного химического травления.

Изучали возможность консервации поверхности алюминиевых сплавов, в частности, нанесение различных неметаллических и металлических покрытий. Покрытия оценивали по технологичности приготовления и нанесения, продолжительности сохранения свойств подготовленной поверхности и технологичности удаления его перед сваркой или возможности сварки с покрытием (для металлических покрытий).

Продолжительность сохранения свойств подготовленной поверхности определяли косвенным методом путем замера контактного электросопротивления. Для этого разработали специальную установку, обеспечивающую небольшое плавное нарастание силы сжатия деталей. Собственное сопротивление установки без контактируемых деталей не более 8...17 мкОм. Сопротивление замеряли непосредственно после подготовки поверхности и нанесения покрытия (или его удаления) через 1; 3; 5; 10; 15 и 30 суток. За допустимое контактное сопротивление принимали с некоторой долей приближения контактное сопротивление деталей через 1...2 и 3...4 ч после шабрения и химического травления соответственно.

Наносили следующие неметаллические покрытия: ЛСП (легко снимаемое), ХВ-139, ХВ-136, ЭЦ-550, ХС-526, ХВ-114, ХВ-16, клей ХВК-9 и пасту АЛКМ-1. Все покрытия наносили на поверхность образцов мягкой кистью после химической подготовки поверхности. Наиболее технологичными оказались покрытия ХВ-139 и ЭЦ-550.

Результаты замеров контактных сопротивлений на образцах с покрытием приведены в табл. 3. Анализ данных показал, что несмотря на наличие защитных покрытий, через 15...30 суток отмечается заметный рост контактных сопротивлений. Это связано с тем, что все применяемые полимерные покрытия в той или иной степени проницаемы для атмосферы.

Таким образом, нанесение защитных неметаллических покрытий на свариваемые кромки позволяет на некоторое время стабилизировать свойства подготовленных поверхностей. Степень стабилизации исходных свойств

3. Контактное сопротивление образцов алюминиевых сплавов с различными покрытиями после выдержки

Сплав	Покрытие	Контактное сопротивление, мкОм, после выдержки, сутки					
		0	1	3	5	7	16
1460	Без покрытия	178	315	530	3130	3350	3760
	ЛСП	330	520	590	640	850	1400
	ХВ-319	330	400	470	490	560	820
	ЭЦ-550	330	380	425	470	530	990
	ХВ-114	330	650	920	980	1150	1690
	ХС-595	330	910	1170	1440	1630	2020
	ХВК	330	405	415	445	570	1130
	АЛКМ-1	330	430	470	510	590	1420
В1341	Без покрытия	145	175	210	380	560	840
	ЛСП	220	345	450	480	640	1050
	ХВ-139	220	330	350	400	430	670
	ХВК	220	300	330	405	440	610

поверхности в значительной степени определяется маркой покрытия и сплава.

Для длительного хранения сроком более 1 месяца наносить защитные неметаллические покрытия нецелесообразно. Поэтому оптимальным способом подготовки поверхности алюминиевых сплавов для дуговой сварки является ТВО и высокоскоростное фрезерование специальным инструментом. Подготовленные поверхности после ТВО сохраняют свои свойства до 1 года.

Результаты экспериментов показали, что минимальное газовыделение с поверхности и практически полное отсутствие пор достигаются при нагреве до (470 ± 10) °С в течение 2...3 ч (для сплавов, легированных литием), (450 ± 10) °С в течение 1,5...2 ч (для сплавов 1150, 1565, АМг6) и (400 ± 10) °С в течение 1...1,5 ч (для сплавов В1341, 1201).

Выводы

1. Строение поверхностного слоя и оксидной пленки на поверхности листов алюминиевых сплавов определяется, в основном, системой легирования сплава.

2. Наиболее эффективными методами подготовки поверхности алюминиевых сплавов под дуговую сварку являются термовакуумная обработка и высокоскоростное фрезерование. Общее газовыделение с поверхности при указанных методах подготовки поверхности в 6—9 раз меньше, чем при широко применяемых стандартных методах.

3. Термовакуумная обработка наиболее эффективна для алюминиевых сплавов систем Al—Mg, Al—Mg—Zn, Al—Mg—Li, Al—Cu—Li и Al—Mg—Cu.

4. Рационально применять термовакуумную обработку ответственных сварных соединений с длительным циклом сборки—сварки, высокоскоростное фрезерование — при сборке—сварке на многофункциональных установках типа УПСФ.

5. Нагрев до сварки в инертном газе, так же как и ТВО, обеспечивает получение качественных сварных соединений без пор, однако требует дополнительного химического травления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Рязанцев В.И., Савостиков А.И.** Исследование газовыделения при нагреве деформируемых свариваемых алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 1990. № 12. С. 32—34.

2. **Овчинников В.В., Рязанцев В.И., Савостиков А.И.** Исследование газовыделения при нагреве деформируемых свариваемых алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 1991. № 6. С. 14—19.

3. **Сборка—сварка** авиационных конструкций на станочных комплексах с ЧПУ / В.И. Рязанцев, В.В. Овчинников, В.Н. Мацнев, В.В. Гринин // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 4. С. 11—17.

Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук, vikov1956@mail.ru;
Александр Михайлович Дриц, канд. техн. наук;
Ирина Александровна Курбатова, канд. техн. наук;
Марина Алексеевна Гуреева, канд. техн. наук

УДК 621.98:539.376

Я.А. Соболев
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)),
В.Н. Чудин
(Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)),
М.В. Кузнецов
(АО "Военно-промышленная корпорация "Научно-производственное объединение машиностроения", г. Реутов)

Формообразование корпусных трехслойных стрингерных панелей

Предложены процесс и расчет технологического режима производства панелей корпусов летательных аппаратов. Процесс основан на локальной осадке и сварке давлением элементов конструкции. Приняты условия пластичности и ползучести деформируемых заготовок. Использован энергетический метод расчета применительно к разрывному полю скоростей перемещений. Приведены режимы технологии и образцы изделий.

Ключевые слова: пластичность; ползучесть; поле скоростей; давление; время; релаксация.

Process and calculation of the technological mode of production of panels airframe are offered. The process is based on the local upsetting and pressure welding of structural elements. Conditions of plasticity and creep of deformed workpieces are accepted. Energy method of calculation applied to discontinuous velocity field movements is used. Modes of technology and products samples are presented.

Keywords: plasticity; creep; velocity field; pressure; time; relaxation.

Корпуса приборных отсеков и обтекателей ракетно-космических аппаратов представляют трехслойную гофрострингерную конструкцию из легких металлических сплавов. По традиционной технологии изготовления составляющие корпус листы соединены неразъемно клепкой или аргоно-дуговой электросваркой. Технология связана с возможной потерей качества изделия по уровню прочности и герметичности при большой трудоемкости производства.

Этих недостатков не имеет сварка давлением в твердой фазе, так как проводится ниже температуры плавления входящих материалов [1]. Процесс включает в себя операции локальной осадки и выдержки под давлением в необходимых режимах деформаций и времени. По такой технологии изготовляют корпусные конструкции вафельного типа [2, 3]. Технологическая схема процесса показана на рис. 1.

Пакет заготовок из внешних плоских листов *1* и внутреннего гофрированного листа *2* с помещенными внутри пакета нажимными планками *3* устанавливается в нагреваемый штамп *4*. Пакет вакуумируют, сжимают давлением гидропресса с выдержкой во времени. Деформации осадки листов между планками и штампом и вызванные этим диффузионные процессы на поверхностях контакта заготовок обеспечивают образование общих зерен и соединения в твердой фазе по поверхностям *5*. После съема готовой панели планки удаляют.

Качество изделия определяется давлением, деформацией, выдержкой во времени. Эти параметры технологии являются предметом расчета. Расчетная схема процесса приведена на рис. 2, *а*. Процесс осуществляется поэтапно: осадка, выдержка под давлением осадки, сброс давления.

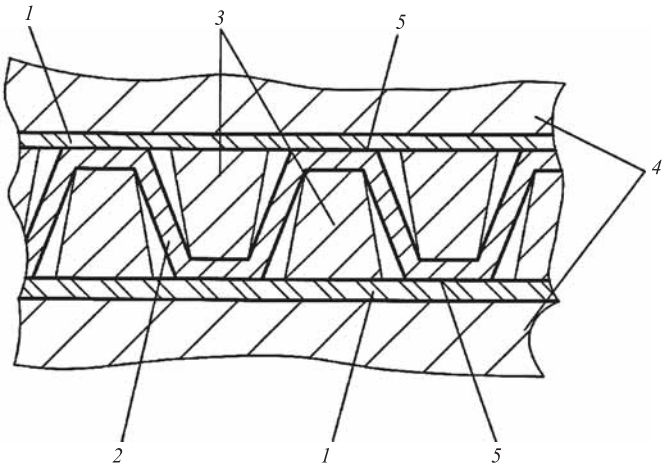


Рис. 1. Технологическая схема процесса

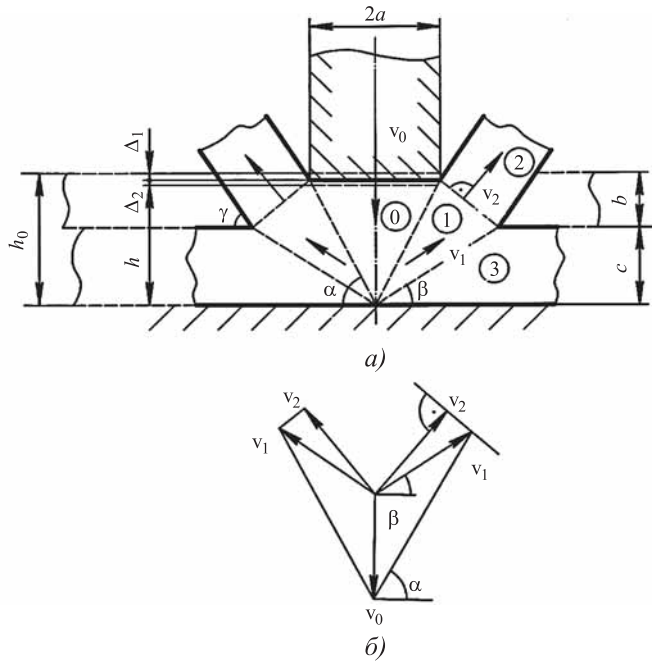


Рис. 2. Расчетная схема процесса:
а — схема и поле скоростей; *б* — годограф скоростей

Локальная осадка. Осадка исходных заготовок проводится, как показано на рис. 1 и 2, *а*, жестким инструментом и соответствует рабочему ходу Δ_1. Материал при кратковременной осадке приняли жесткопластическим, упрочняющимся, чему соответствует уравнение

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m, \qquad (1)$$

где σ_i, ε_i — интенсивность напряжений и деформаций соответственно; A, m — константы упрочнения материала.

Давление операции рассчитывали, используя экстремальную верхнеграничную теорему пластичности [4] с привлечением разрывного жесткоблочного поля скоростей перемещений при плоской деформации. Поле и его годограф скоростей показаны также на рис. 2. Поле состоит из подвижных блоков "0", "1", "2" и неподвижного блока "3". Блоки разделены линиями разрыва скоростей "01", "12", "13", где возникают деформации. Длины линии разрыва скоростей:

$$l_{01} = \frac{a}{\cos\alpha_1};\ l_{12} = b\cos\frac{\gamma}{2};\ l_{13} = \frac{c}{\sin\beta}. \qquad (2)$$

Установим кинематические и деформационные соотношения, используя годограф. Скорости перемещения блоков:

$$v_0, v_1 = \frac{v_0\sin\alpha}{\sin(\alpha-\beta)};\ v_2 = \frac{a}{b}v_0.$$

На линиях разрыва

$$v_{\tau_{01}} = \frac{v_0\cos\beta}{\sin(\alpha-\beta)};\ v_{n_{01}} = v_0\cos\alpha, \qquad (3)$$

где $v_{\tau_{01}}$, $v_{n_{01}}$ — касательная и нормальная скорости соответственно на линии "01";

$$\varepsilon_{i_{01}} = \frac{v_\tau}{\sqrt{3}v_n} = \frac{\cos\beta}{\sqrt{3}\cos\alpha\sin(\alpha-\beta)}, \qquad (4)$$

где $\varepsilon_{i_{01}}$ — интенсивность деформации на этой линии.

На линии "12" аналогично:

$$v_{\tau_{12}} = \frac{av_0\mathrm{tg}\left(\beta-\frac{\gamma}{2}\right)}{b\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)};\ v_{n_{12}} = v_2 = \frac{av_0}{b\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)}; \qquad (5)$$

$$\varepsilon_{i_{12}} = \frac{1}{\sqrt{3}}\mathrm{tg}\left(\beta-\frac{\gamma}{2}\right). \qquad (6)$$

На линии "13":

$$v_{\tau_{13}} = v_1 = \frac{v_0\cos\alpha}{\sin(\alpha-\beta)};\ v_{n_{13}} = 0; \qquad (7)$$

$$\varepsilon_{i_{13}} = \frac{v_\tau\Delta_1}{\sqrt{3}l_{13}v_0} = \frac{\Delta_1\mathrm{tg}\beta}{c\sqrt{3}(\mathrm{tg}\alpha-\mathrm{tg}\beta)}, \qquad (8)$$

где v_0 — скорость перемещения инструмента.

Интенсивности напряжений на линиях разрыва скоростей определяют уравнением (1) при подстановке выражений (4), (6), (8). В соответствии с экстремальной верхнеграничной

теоремой при учете уравнения (1), соотношений для длин линий разрыва (2) и касательных скоростей (3), (5), (7) справедливо неравенство, определяющее давление осадки:

$$q \leqslant \frac{1}{a\mathrm{v}_0\sqrt{3}}\Sigma\sigma_i\mathrm{v}_\tau l = \frac{A}{\sqrt{3}}\times$$
$$\times\left[\frac{1}{\sin(\alpha-\beta)}\left(\varepsilon_{i_{01}}^m\frac{\cos\beta}{\cos\alpha}+\varepsilon_{i_{13}}^m\frac{c\cos\alpha}{a\sin\beta}\right)+\varepsilon_{i_{12}}^m\mathrm{tg}\left(\beta-\frac{\gamma}{2}\right)\right]. \quad (9)$$

Соединение заготовок. При завершении осадки пакет заготовок выдерживают под постоянным давлением (9). Происходит ползучесть материала на величину хода Δ_2 (см. рис. 2, *а*). Состояние деформируемого материала на этом этапе — вязкопластичность, чему соответствует уравнение [1, 3]

$$\xi_i = \frac{d\varepsilon_{i\,\text{пл}}}{dt} + \varepsilon_{i\,\text{полз}}, \quad (10)$$

где

$$\frac{d\varepsilon_{i\,\text{пл}}}{dt} = \frac{1}{m}\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{m}}\sigma_i^{\frac{1}{m}-1}\frac{d\sigma_i}{dt}, \quad (11)$$

что следует из выражения (1);

$$\varepsilon_{i\,\text{полз}} = \frac{d\varepsilon_{i\,\text{полз}}}{dt} = B\sigma_i^n, \quad (12)$$

где $\varepsilon_{i\,\text{полз}}$ — интенсивность скоростей деформаций ползучести; $\varepsilon_{i\,\text{пл}}$ — интенсивность пластических деформаций (4), (8); t — время; B, n — константы ползучести.

Эквивалентное напряжение в зависимостях (11), (12) определяется уравнением (1) при учете выражений (4) или (8). На данном этапе давление постоянно и, следовательно,

$$\sigma_i = \text{const};\ \frac{d\sigma_i}{dt} = 0.$$

Уравнение (10) при этом условии сводится к уравнению (12) при эквивалентной деформации

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{h_0}{h}, \quad (13)$$

где h_0, h — начальная и конечная толщина листов соответственно в месте соединения.

Подстановка выражения (13) в уравнение (10) определяет длительность этапа ползучести:

$$t_{\text{полз}} = \frac{2}{\sqrt{3}B\sigma_i^n}\ln\frac{h_0}{h}. \quad (14)$$

На следующем этапе давление снимают при закрытом штампе. Происходит релаксация напряжений. При этом:

$$\varepsilon_i = \text{const};\ \frac{d\varepsilon_i}{dt} = 0$$

и уравнение (10) получает вид

$$\frac{1}{m}\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{m}}\frac{1}{B}\sigma_i^{\frac{1}{m}-n-1} = dt.$$

Интегрирование этого уравнения при конечном значении $\sigma_i = 0$ приводит к зависимости для расчета длительности этапа релаксации:

$$t_\text{р} = \frac{1}{1-mn}\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{m}}\frac{1}{B}\sigma_i^{\frac{1}{m}-n}. \quad (15)$$

Время всего процесса определяется суммой времени осадки, ползучести (14) и релаксации (15).

Расчетно-технологические данные. Режимы технологии процесса получены применительно к изготовлению фрагментов корпуса (панелей) из сплавов ВТ14 при 900 °С и АМг6 при 500 °С. Габаритные размеры панели 20×250×400 мм, толщина наружных листов 2 мм, толщина внутреннего гофрированного листа 1 мм.

Соединение листовых заготовок при осадке осуществлялось на гидропрессе в вакуумируемом штамповом блоке (рис. 3) при остаточном

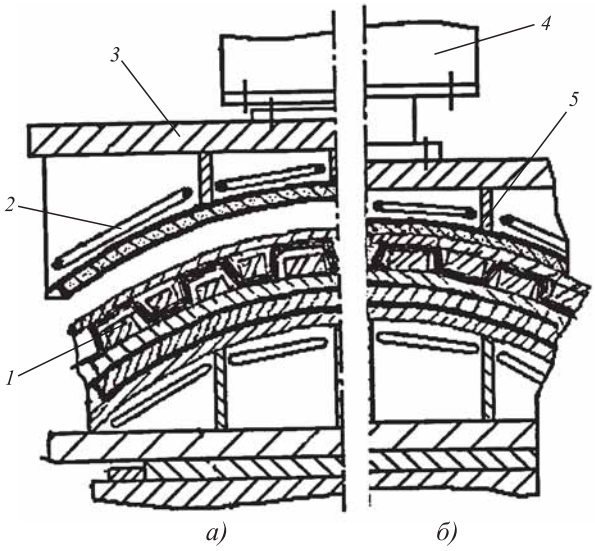


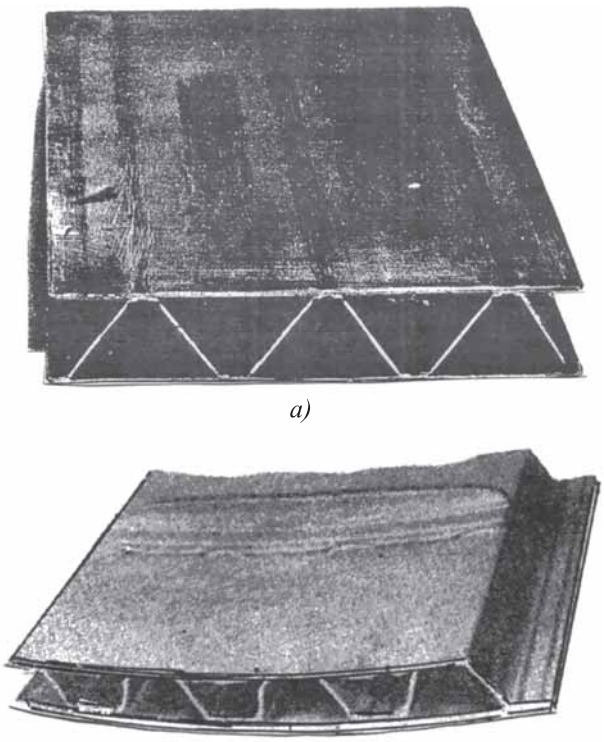
Рис. 3. Блок для осадки—сварки:

а — исходное положение (открытое); *б* — рабочее положение (закрытое); *1* — сборка деталей; *2* — нагреватели; *3* — плита; *4* — гидрошток; *5* — изделие

Технологические режимы операций

Материал	$\Delta_1 + \Delta_2$, мм	q, МПа	t, мин	Релаксация $t_р$, мин	Общее время, мин
ВТ14	0,5...0,8	15...17	30	15...20	45...60
АМг6	1,0...1,2	20...23	45		

давлении $66{,}661 \cdot 10^{-4}$ Па ($0{,}5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст). Оптимальные режимы технологии, полученные на основе расчета и опытных данных, приведены в таблице.



а)

б)

Рис. 4. Образцы панелей:
а — сплав ВТ14; *б* — сплав АМг6

Процесс, как следует из представленных данных, осуществляется при достаточно небольших деформациях и невысоком давлении. Соединение заготовок из алюминиевого сплава требует более высоких деформаций и давления.

Проведены металлографические и механические испытания изделий [2]. Установлено, что на общих контактных поверхностях листовых материалов образуются общие зерна. Предел прочности соединения и герметичность соответствуют исходным материалам. Фрагменты корпусов представлены на рис. 4.

Заключение. Процесс соединения давлением элементов стрингерных панелей корпусов позволяет изготовлять конструкции высокого качества. Режимы технологии (давление, деформация, время) должны быть регламентированы и взаимосвязаны на стадии проектирования производства изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Федосов С.А., Оськин И.Э.** Основы технологии сварки. М.: Машиностроение, 2013. 125 с.
2. **Яковлев С.П. и др.** Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2003. 427 с.
3. **Иудин В.Н.** Соединение элементов корпусных конструкций давлением // Вестник машиностроения. 2014. № 1. С. 78—80.
4. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УГТУ, 2001. 836 с.

Яков Алексеевич Соболев, д-р техн. наук,
yasobolev@mail.ru;
Владимир Николаевич Чудин, д-р техн. наук;
Максим Владимирович Кузнецов

УДК 621.979-82

М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, Л.Б. Шнайдер
(ООО "Уральский инжиниринговый центр", г. Челябинск)

Реконструкция ковочного пресса "UNITED" силой 20 МН

Приведена информация о технических решениях, реализованных при замене пароводяного привода ковочного пресса производства фирмы UNITED на гидропривод с машинным управлением, работающий на минеральном масле.

Ключевые слова: гидропривод пресса; наполнение рабочих гидроцилиндров во время холостого хода; снижение потерь энергии; режимы работы; технические характеристики.

The information about the technical solutions implemented by replacing steam-water drive of forging press of company UNITED production on drive with the computer control, working on mineral oil is presented.

Keywords: hydraulic drive of press; filling of working cylinders during idling; reduction of energy losses; modes; specifications.

До настоящего времени на ряде предприятий нашей страны эксплуатируются прессы с парогидравлическим приводом. Из-за низкого коэффициента полезного действия парогидравлического привода и постепенного сокращения числа источников пара со второй половины прошлого века взамен парогидравлического привода применяют гидравлический (см. кн.: Модернизация кузнечно-штамповочного оборудования / под общ. ред. А.П. Иванова, В.Д. Лисицына. М.—Л.: Машгиз, 1961. 227 с. и [1]).

В подавляющем большинстве случаев на прессах с парогидравлическим приводом в качестве рабочей жидкости используют воду или водную эмульсию; жидкость высокого давления в период выполнения рабочего хода поступает в рабочие гидроцилиндры подвижной траверсы пресса из мультипликатора, преобразующего энергию пара в энергию жидкости; для подачи жидкости в возвратные гидроцилиндры пресса используют насосно-аккумуляторную станцию (см. кн.: Мюллер Э. Гидравлические прессы и их приводы. Т. 1. Ковочные прессы / пер. с нем. М.: Машиностроение, 1965. 316 с.).

В связи с этим при переходе от парогидравлического привода к гидравлическому обычно в качестве рабочей жидкости сохраняют воду или водную эмульсию, в качестве источника жидкости высокого давления используют насосно-аккумуляторную станцию, а гидравлический привод выполняют с дроссельным управлением.

Ковочный пресс с пароводяным приводом силой 20 МН производства фирмы UNITED (США), реконструкция которого была проведена в 2015 г. ООО "Уральский инжиниринговый центр" (г. Челябинск) по заказу ООО "Северный Металлоцентр" (г. Санкт-Петербург), обладал той особенностью, что для подъема подвижной траверсы использовалась не жидкость, а пар, т.е. возвратные (подъемные) цилиндры были не гидравлическими, а паровыми. Поэтому пресс не был укомплектован для обеспечения перемещения подвижной траверсы насосной установкой.

Поскольку одной из главных целей реконструкции пресса являлось повышение его коэффициента полезного действия при минимально возможных затратах, то с учетом изложенного выше было принято решение при замене парогидравлического привода на гидравлический отказаться от дроссельного способа управления (за исключением случая холостого хода подвижной траверсы вниз, который происходит под действием силы ее тяжести) и в качестве рабочей жидкости использовать минеральное масло.

Выбор в качестве рабочей жидкости масла вместо воды или водной эмульсии продиктован более низкой стоимостью, большей доступностью (распространенностью) и более продолжительным сроком службы гидрооборудования для масляных гидросистем по сравнению с аналогичным по назначению гидрооборудованием для гидросистем, ра-

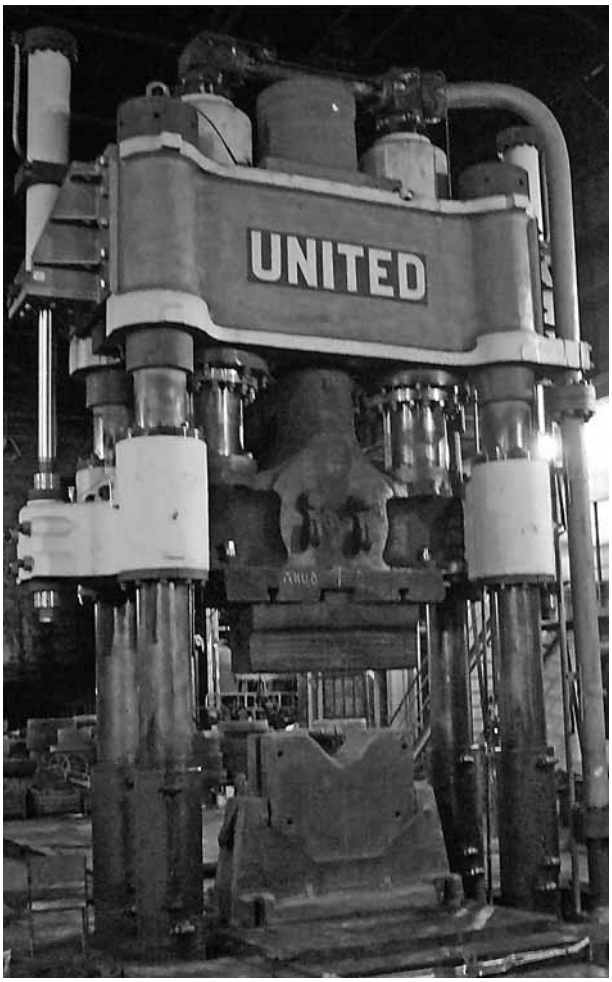


Рис. 1. Общий вид ковочного пресса "UNITED"

ботающих на воде и водной эмульсии. Большинство известных мировых производителей прессов (в частности, PAHNKE, SMS MEER, SIEMPELKAMP (Германия), DANIELI (Италия)) в течение многих лет успешно выпускают мощные прессы (в том числе и ковочные) с гидросистемами, работающими на масле [2].

При реконструкции пресса "UNITED" (рис. 1) из существующего гидрооборудования сохранились только рабочие гидроцилиндры (пресс выполнен с двумя рабочими плунжерными гидроцилиндрами, рабочие полости которых соединены между собой) и гидроцилиндры привода стола. При этом узел уплотнения плунжеров рабочих гидроцилиндров был подвергнут доработке для повышения его герметичности. Новые подъемные гидроцилиндры спроектированы и изготовлены таким образом, что их соединение с архитравом и подвижной траверсой пресса не потребовало каких-либо доработок последних.

При проведении модернизации гидросистемы пресса была поставлена задача не использовать в ней сосуды высокого давления, подлежащие регистрации в органах Ростехнадзора, а также бак наполнения.

Применение бака наполнения, работающего под манометрическим давлением, исключено автоматически как сосуда высокого давления. Использование бака наполнения, работающего под атмосферным давлением и находящегося выше рабочих гидроцилиндров гидропривода подвижной траверсы пресса (пресс выполнен с верхним расположением рабочих гидроцилиндров), было нежелательным из-за низкого расположения подкрановых путей в цехе.

Одним из вариантов обеспечения качественного (без нарушения сплошности жидкости) заполнения полостей рабочих гидроцилиндров при холостом ходе подвижной траверсы пресса вниз с повышенной скоростью является применение гидропреобразователя, работающего как мультипликатор расхода и обеспечивающего получение необходимого расхода рабочей жидкости за счет энергии жидкости, подаваемой при меньшем расходе силовыми насосами гидропривода пресса. Такой гидропреобразователь может быть выполнен как поступательного, так и вращательного движения (рис. 2).

При реконструкции пресса "UNITED" было использовано другое техническое решение: в гидросистему пресса в дополнение к силовым насосам (насосам, входящим в состав насосной установки высокого давления) для заполнения полостей рабочих гидроцилиндров при холостом ходе подвижной траверсы пресса вниз с повышенной скоростью введены насосы низкого давления (насосы, входящие в состав насосной установки низкого давления) (рис. 3).

При таком исполнении гидросистемы пресса подача силовых насосов выбирается из условия обеспечения заданной максимальной скорости осуществления рабочего хода подвижной траверсы, а подача насосов низкого давления — из условия обеспечения совместно с силовыми насосами расхода рабочей жидкости, соответствующего заданной максимальной скорости осуществления холостого хода подвижной траверсы вниз.

В реконструированной гидросистеме пресса "UNITED" в составе насосной установки

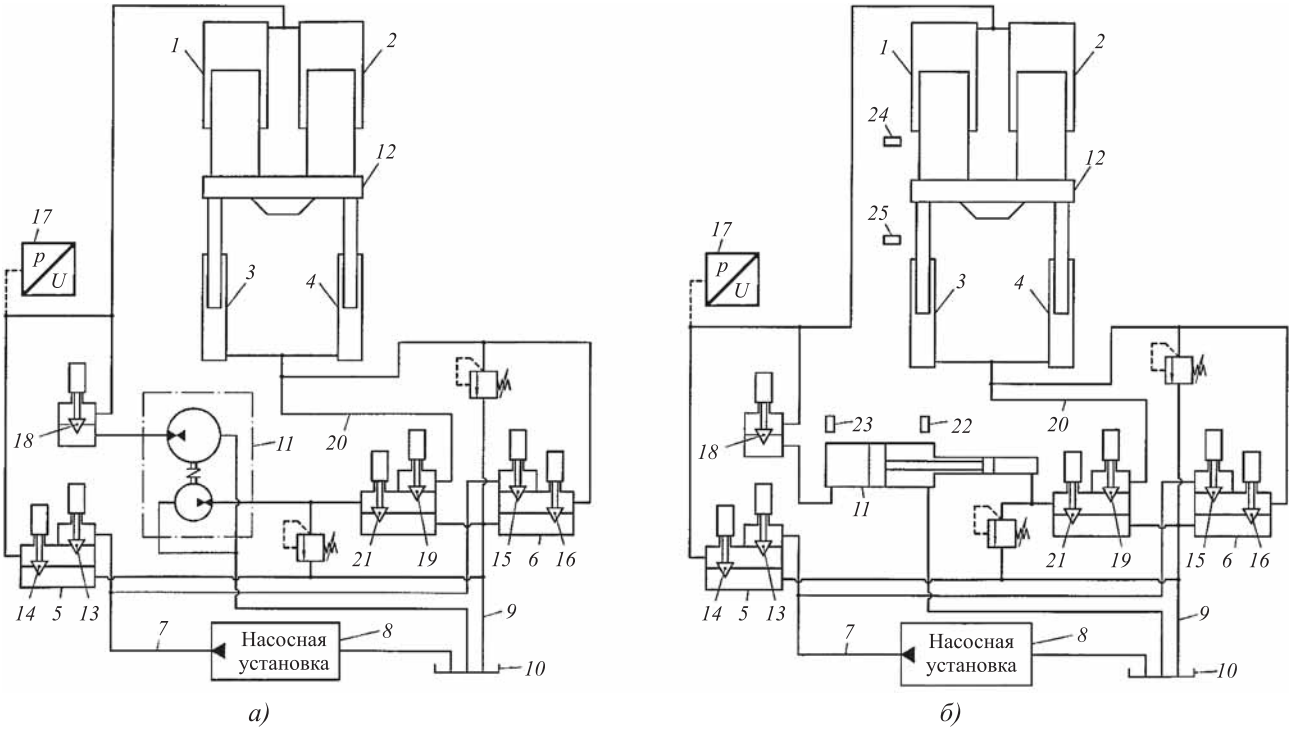


Рис. 2. Упрощенные принципиальные схемы гидропривода подвижной траверсы вертикального пресса с гидропреобразователем вращательного (*а*) и поступательного (*б*) движения (заявка на изобретение RU № 2015121208):

1, *2* — рабочие гидроцилиндры; *3*, *4* — возвратные гидроцилиндры; *5* — гидрораспределитель рабочих гидроцилиндров; *6* — гидрораспределитель возвратных гидроцилиндров; *7* — напорная гидролиния; *8* — насосная установка; *9* — сливная гидролиния; *10* — гидробак; *11* — гидропреобразователь; *12* — подвижная траверса; *13—16*, *18*, *19*, *21* — управляемые клапаны; *17* — датчик давления; *20* — напорная гидролиния для клапана *19*; *22—25* — концевые выключатели

высокого давления используются семь силовых насосов, из которых пять насосов являются нерегулируемыми, а два насоса — регулируемыми и выполнены с пропорциональным электрическим управлением.

Наличие насосов с пропорциональным электрическим управлением позволяет плавно регулировать скорость подъема подвижной траверсы пресса практически во всем предусмотренном техническим заданием диапазоне изменения этой скорости, а во время рабочего хода пресса плавно снижать скорость движения подвижной траверсы при приближении ее к положению, соответствующему заданной координате останова [3, 4], и тем самым обеспечивать высокую точность (±2 мм) достижения ковочного размера.

При повышенных скоростях движения подвижной траверсы во время выполнения рабочего хода изменение скорости траверсы осуществляется ступенчато путем перевода части силовых нерегулируемых насосов с режима разгрузки в режим работы на нагрузку (для увеличения скорости движения траверсы) или наоборот (для уменьшения скорости движения траверсы). Предусмотрена возможность автоматической разгрузки части силовых нерегулируемых насосов в период выполнения рабочего хода пресса в функции давления в общем напорном коллекторе силовых насосов (и, соответственно, в рабочих гидроцилиндрах) для ограничения потребляемой прессом мощности на заранее установленном уровне.

Реализован также режим работы пресса с ограничением максимальной развиваемой им силой. При использовании указанного режима в случае достижения давлением в рабочих полостях рабочих гидроцилиндров (в соответствии с сигналом соответствующего датчика давления) заданного значения выполнение рабочего хода траверсы автоматически прекращается.

В составе насосной установки низкого давления модернизированной гидросистемы пресса используются два идентичных центробежных насоса, каждый из которых соединяется с полостями рабочих гидроцилиндров через индивидуальный клапан с электро-

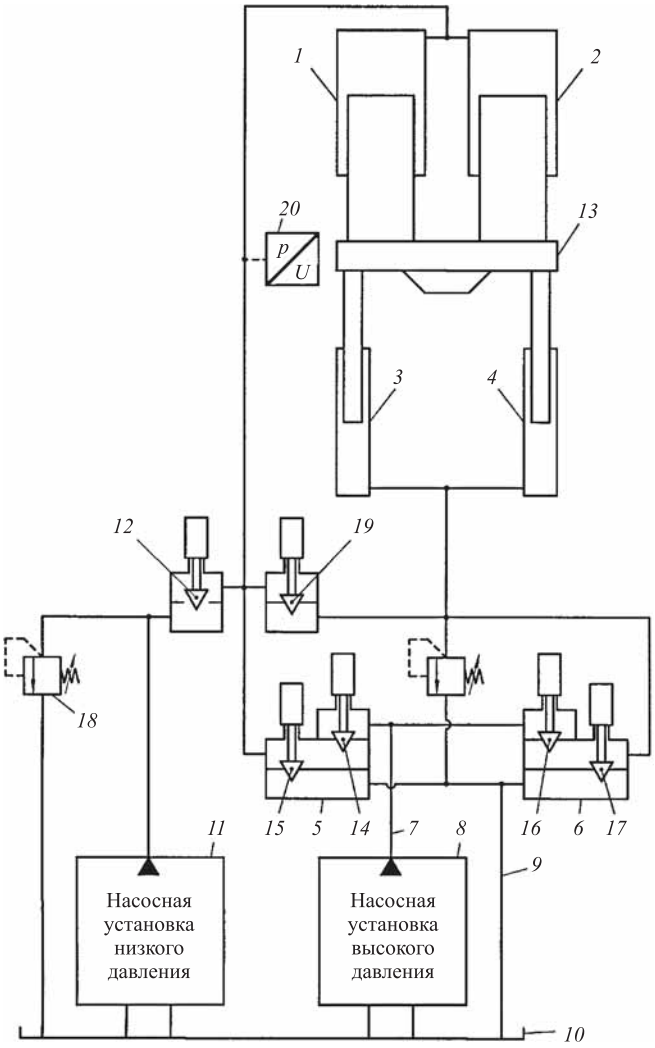


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема гидропривода подвижной траверсы вертикального пресса с использованием для наполнения рабочих гидроцилиндров насосов низкого давления (заявка на изобретение RU № 2015135149):

1, *2* — рабочие гидроцилиндры; *3*, *4* — возвратные гидроцилиндры; *5* — гидрораспределитель рабочих гидроцилиндров; *6* — гидрораспределитель возвратных гидроцилиндров; *7* — напорная гидролиния; *8* — насосная установка высокого давления; *9* — сливная гидролиния; *10* — гидробак; *11* — насосная установка низкого давления; *12*, *14—17*, *19* — управляемые клапаны; *13* — подвижная траверса; *18* — предохранительный клапан; *20* — датчик давления

гидравлическим управлением, выполняющий функцию клапана наполнения.

Разгрузка рабочих гидроцилиндров от высокого давления по окончании рабочего хода пресса и слив масла из указанных гидроцилиндров в гидробак гидросистемы, находящийся под атмосферным давлением, при подъеме подвижной траверсы осуществляются через соответственно разгрузочный и сливной клапаны с электрогидравлическим управлением, входящие в состав гидрораспределителя рабочих гидроцилиндров.

Для обеспечения поддержания практически постоянного давления в рабочих полостях подъемных гидроцилиндров при работе пресса в режиме шлихтовки (проглаживания) в состав гидросистемы пресса включены три пневмогидравлических аккумулятора вместимостью по 50 л каждый.

Гидрораспределитель подъемных гидроцилиндров содержит в своем составе два напорных и два сливных клапана с электрогидравлическим управлением, два регулируемых дросселя и предохранительный клапан. Посредством одного из напорных клапанов рабочие полости подъемных гидроцилиндров могут соединяться с общим напорным коллектором силовых насосов (для осуществления подъема подвижной траверсы при работе пресса в режиме ковки), а посредством другого (при работе пресса в режиме шлихтовки) — с общим напорным коллектором пневмогидравлических аккумуляторов. Два сливных клапана в сочетании с регулируемыми дросселями позволяют обеспечить три настраиваемых скорости холостого хода вниз ("свободного" опускания) подвижной траверсы пресса.

Все клапаны с электрогидравлическим управлением (типа LC с крышками типа LFA производства компании Bosch Rexroth AG, Германия) имеют встраиваемое исполнение и являются нормально закрытыми, т.е. при обесточенном электромагните управления проходное сечение клапана закрыто. При подаче напряжения на электромагнит напорного клапана, с помощью которого рабочие полости подъемных гидроцилиндров соединяются с общим напорным коллектором пневмогидравлических аккумуляторов, движение жидкости через этот клапан может осуществляться в обоих возможных направлениях. Остальные клапаны при подаче напряжения на их электромагнит управления допускают движение жидкости только в одном направлении.

При работе пресса в режиме шлихтовки электромагнит управления напорным клапаном рабочих гидроцилиндров постоянно находится под напряжением (что возможно благодаря тому, что рабочие полости подъемных гидроцилиндров на этом режиме работы пресса соединены с общим напорным коллекто-

ром пневмогидравлических аккумуляторов), а перемещение подвижной траверсы вверх или вниз обеспечивается в результате перевода силовых насосов из режима работы на нагрузку в режим разгрузки или, наоборот, при одновременном осуществлении соответственно подачи напряжения на электромагниты управления разгрузочным и сливным клапанами рабочих гидроцилиндров или обесточивания электромагнитов.

Для подзарядки пневмогидравлических аккумуляторов, к общему напорному коллектору которых присоединена также напорная гидролиния управления регулируемых насосов, используется насос управления.

Для решения задач поддержания требуемых температуры и чистоты рабочей жидкости в гидробаке пресса установлены электронагреватели и в составе его гидросистемы имеется контур фильтрации и охлаждения рабочей жидкости, в который входят два циркуляционных насоса, фильтры и пластинчатый разборный теплообменный аппарат с водяным охлаждением.

Все гидрооборудование пресса (за исключением гидроцилиндров привода подвижной траверсы и стола, а также части трубопроводов) размещено в отдельном помещении насосной установки (на нулевой отметке цеха). Помещение пультовой оператора пресса расположено рядом с помещением насосной установки таким образом, что из него через окно в боковой стене можно наблюдать за тем, что происходит в помещении насосной установки.

Электрогидравлическая система управления пресса содержит в своем составе два пульта: главный пульт управления, расположенный в помещении пультовой оператора, и местный пульт управления, расположенный в помещении насосной установки и предназначенный для проведения наладочных работ.

Контроллерная часть системы управления пресса выполнена на базе аппаратных и программных средств производства компании OMRON (Япония). Главный пульт управления укомплектован панелью оператора модели NA5-15W101S, обеспечивающей: визуализацию работы электрогидравлической системы управления прессом; ввод и редактирование различных параметров, регламентирующих работу системы управления; вывод предупредительных, информационных и аварийных сообщений.

С точки зрения выполняемых технологических операций пресс может работать в режимах ковки и шлихтовки. С точки зрения возможностей управления пресс может работать в наладочном режиме, режиме смены инструмента, ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах управления. Выбор режимов работы осуществляется оператором посредством соответствующих переключателей, расположенных на главном пульте управления пресса.

При работе в режиме "Смена инструмента" исключается возможность повышения давления в полостях рабочих гидроцилиндров сверх давления, создаваемого центробежными насосами (насосами низкого давления). При работе в режиме "Ковка" предусмотрена возможность блокирования перехода от холостого хода подвижной траверсы вниз к рабочему ходу путем удержания в нажатом состоянии соответствующей кнопки на ручке джойстика управления траверсой.

В рамках режима "Ковка" для случая ручного управления прессом предусмотрен дополнительный режим "Рубка". Данный режим предназначен для использования при выполнении операции рубки заготовок и отличается тем, что после установки оператором ручки джойстика управления подвижной траверсой пресса в нейтральное положение после выполнения рабочего хода разгрузка рабочих гидроцилиндров от давления не производится до тех пор, пока оператор не переместит ручку джойстика в положение, соответствующее подъему подвижной траверсы. Благодаря этому после врезания в заготовку топора, посредством которого осуществляется рубка, улучшаются условия для корректировки угла наклона топора (установки топора в вертикальное положение) путем перемещения стола пресса.

Реализованная структура гидропривода при работе пресса в режиме ковки позволяет переводить силовые насосы с разгрузочного режима в режим работы на нагрузку (предварительно на электромагнит управления напорным клапаном рабочих гидроцилиндров должно быть подано напряжение) с самого начала выполнения холостого хода подвижной траверсы вниз. В этом случае рабочий ход подвижной траверсы при наличии команды на ее перемещение вниз начинается самопроизвольно после появления сопротивления пере-

мещению траверсы, и для его начала не требуется осуществлять контроль давления в рабочих полостях подъемных гидроцилиндров и скорости движения траверсы (что необходимо при использовании насосно-аккумуляторного гидропривода обычного для прессов исполнения [5]).

Технические характеристики работы пресса после реконструкции полностью соответствуют требованиям технического задания на ее проведение.

Основные технические характеристики работы пресса

Максимальное рабочее давление питания гидропривода, МПа:	
подвижной траверсы	40
стола	18
Число ступеней силы	1
Номинальная сила пресса, МН	20
Наибольший ход подвижной траверсы, мм	1830
Максимальная скорость движения подвижной траверсы, мм/с:	
при холостом ходе вниз	120
при рабочем ходе	50
при подъеме	140
Способ регулирования скорости движения подвижной траверсы:	
при холостом ходе вниз	ступенчатый
во время рабочего хода	ступенчатый (на скоростях движения до 10 мм/с — машинный непрерывный)
при подъеме	машинный непрерывный
Наибольшее число рабочих ходов подвижной траверсы в минуту (не менее) при максимальной силе деформации, не превышающей 80 % от номинальной силы пресса:	
при ковке (при глубине деформации поковки не более 100 мм и высоте поднятия бойка над поковкой не более 50 мм)	10
при шлихтовке (при ходе траверсы не более 20 мм)	40
Точность обеспечения ковочного размера, мм	±2
Максимальная скорость перемещения стола, мм/с	100
Способ регулирования скорости движения стола	машинный непрерывный

Заключение. Получен положительный опыт использования на ковочном прессе гидропривода с машинным управлением и подтверждена целесообразность применения такого гидропривода.

Применение в гидросистеме ковочного пресса (в дополнение к насосам высокого давления) насосов низкого давления позволяет обеспечить качественное (без нарушения сплошности жидкости) заполнение полостей рабочих гидроцилиндров при холостом ходе подвижной траверсы пресса вниз с повышенной скоростью и исключить необходимость в использовании на прессе бака наполнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Блик Ф.С.** Модернизация мощного кузнечно-прессового оборудования. Екатеринбург: ООО "Компания КОПИМАРКЕТ", 2013. 356 с.
2. **Ганс-Йоахим Панке** и разработка пресса свободной ковки / Сост.: В. Вестермейер; под ред. К. Бильхарца. Метцинген (Германия): ВЕПУКО ПАНКЕ Гмбх, 2012. 53 с.
3. **Управление** остановкой подвижной траверсы пресса в заданном положении / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, А.А. Батурин // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 6. С. 22—26.
4. **Управление** подвижной траверсой ковочного пресса в автоматическом режиме работы / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, П.Б. Серебряков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 6. С. 14—19.
5. **Режимы** работы штамповочного пресса НП-130 с модернизированной электрогидравлической системой управления / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, А.А. Носенко // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 3. С. 31—34.

Максим Ефимович Гойдо, канд. техн. наук,
goido@cheltec.ru;
Валерий Владимирович Бодров, канд. техн. наук;
Рамиль Мерсеитович Багаутдинов;
Леонид Бенюминович Шнайдер

УДК 621.77

А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)

Моделирование кинематики течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083*

На основе математического моделирования методом конечных элементов выполнено численное исследование закономерностей кинематики течения металла в очаге деформации при холодной асимметричной прокатке алюминиевого сплава 5083. Установлены закономерности совместного влияния рассогласования скоростей валков, коэффициента контактного трения и степени деформации на формирование кинематических зон очага деформации. Результаты исследования могут быть полезны при разработке оптимальных режимов асимметричной прокатки алюминиевых сплавов в условиях интенсивной сдвиговой деформации для получения субмикрокристаллической структуры и повышенных прочностных свойств.

Ключевые слова: асимметричная прокатка; прокатка с рассогласованием скоростей; метод конечных элементов; алюминиевый сплав; кинематика течения металла.

The finite element method simulation of regularities of the kinematics of metal flow in the deformation zone during asymmetric cold rolling of aluminum alloy 5083 is presented. The joint effect of differential speed rolling, contact friction coefficient and the reduction ratio on the formation of kinematic zones is founded. The results of investigation could be useful in the development of optimal modes of asymmetric rolling of aluminum alloys under severe shear strain to obtain the submicrocrystalline grain structure and high strength properties.

Keywords: asymmetric rolling; differential speed rolling; finite element method; aluminum alloy; kinematics of metal flow.

Введение. Ключевым направлением технологического прогресса является создание новых легких и сверхпрочных конструкционных материалов для различных отраслей промышленности, в особенности для транспортного машиностроения. Одним из возможных путей решения этой задачи является повышение прочности деформируемых алюминиевых сплавов за счет формирования в них субмикрокристаллической структуры с использованием методов *интенсивной пластической деформации* (ИПД) [1]. Однако несмотря на многообразие методов ИПД и высокую эффективность некоторых из них, создание технологий для промышленного использования и в особенности для производства серийной тонколистовой металлопродукции является сложной научно-технической проблемой.

Одним из наиболее перспективных высокопроизводительных методов ИПД для производства субмикрокристаллических тонких листов и полос из алюминиевых сплавов повышенной прочности является процесс асимметричной прокатки с целенаправленно создаваемым рассогласованием окружных скоростей валков [2—7].

Эффективность деформационного измельчения зерен зависит от кинематических особенностей этого процесса, влияющих на деформацию

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10030).

(сжатия и сдвига), которую процесс может сообщить металлу до его разрушения, а также температурно-скоростных условий деформирования, гидростатического давления и пути нагружения (монотонное, немонотонное, знакопеременное).

Задачей кинематики в теории обработки металлов давлением является определение скорости перемещения деформируемого металла относительно инструмента. Асимметрия при прокатке приводит к изменению кинематики очага деформации, т.е. изменению протяженности зон отставания и опережения со стороны верхнего и нижнего валков.

В соответствии с этим явлением различают следующие случаи асимметричной прокатки [8]:

1) общий случай, когда в очаге деформации имеются две кинематические зоны — отставания и опережения, но протяженности этих зон со стороны верхнего и нижнего валков неодинаковы;

2) полупредельный случай, когда на одном валке имеются две зоны — отставания и опережения, а на другом валке только одна зона — отставания или опережения;

3) предельный случай, когда на одном валке реализуется только зона отставания, а на другом валке — только зона опережения.

Асимметрия кинематических зон со стороны верхнего и нижнего валков приводит к формированию так называемой смешанной зоны, в которой силы контактного трения являются противоположно направленными. Это обеспечивает создание сдвиговых деформаций в прокатываемом металле.

Однако несмотря на большое количество научных работ по данной тематике [2—10], нерешенным остается вопрос создания научно-обоснованных кинематических параметров асимметричной прокатки, обеспечивающих реализацию процесса в режиме ИПД с большими сдвиговыми деформациями.

Целью работы является исследование закономерностей совместного влияния рассогласования скоростей валков, коэффициента трения и степени деформации на кинематику течения металла при холодной асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083, а также оценка влияния степени кинематической асимметрии на сдвиговую деформацию металла.

Материалы и метод исследования. Одним из эффективных методов численного решения задач механики и кинематики деформируемого твердого тела является метод конечных элементов. Математическое моделирование процесса асимметричной тонколистовой прокатки алюминиевого сплава 5083 проводили в двумерной постановке задачи с использованием специализированного программного комплекса DEFORM-2D. Прокатку осуществляли за один проход без натяжений.

При математическом моделировании процесса приняты следующие допущения:

1) плоскодеформированное состояние металла;

2) деформируемая среда — упрочняющаяся жесткопластическая;

3) рабочие валки — абсолютно жесткие;

4) условия — изотермические, поэтому прокатку проводили при низкой скорости деформирования (менее 5 мм/с).

Трение описывали согласно закону Кулона (1) с ограничением (2):

$$\tau = \mu p \text{ при } \mu p < k; \quad (1)$$

$$\tau = k \text{ при } \mu p \geqslant k, \quad (2)$$

где τ — касательное напряжение трения; μ — коэффициент трения; p — контактное нормальное напряжение; k — предел текучести на сдвиг.

Исходные данные для моделирования процесса:

1) начальная толщина полосы 2,0 мм;

2) температура деформируемого металла 20 °С;

3) радиус валков R = 100 мм;

4) коэффициент трения μ = 0,05...0,4;

5) степень деформации (обжатие) ε = 50...70 %.

Кривую текучести алюминиевого сплава 5083 (при 20 °С) задавали из библиотеки материалов DEFORM-2D. Во всех вариантах расчета окружная скорость нижнего валка v_1 = 5 мм/с. Для создания кинематической асимметрии процесса окружную скорость верхнего валка v_2 снижали на 10...90 % относительно окружной скорости нижнего валка.

Границы кинематических зон в очаге деформации определяются положением нейтральных точек N_1 и N_2, в которых скорости течения металла равны окружным скоростям валков, а касательные напряжения трения τ меняют знак на противоположный (рис. 1).

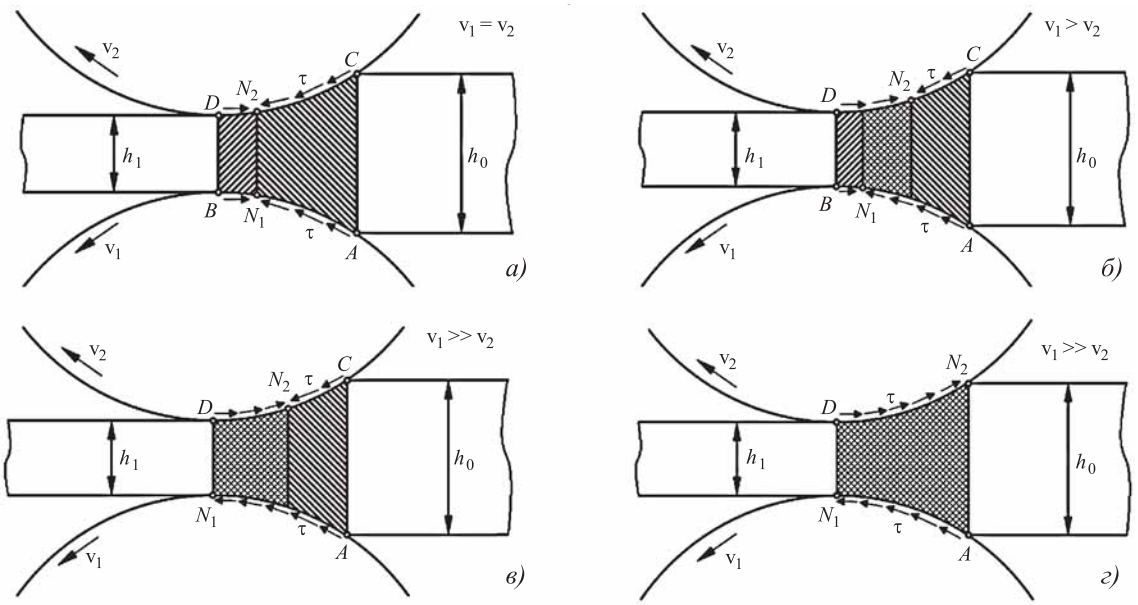


Рис. 1. Кинематические зоны в очаге деформации при симметричной (*а*) и асимметричной прокатке в общем (*б*), полупредельном (*в*) и предельном случаях (*г*)

На рис. 1 обозначено: AB — длина очага деформации на контакте с нижним валком; CD — длина очага деформации на контакте с верхним валком; N_1, N_2 — нейтральные точки соответственно на контакте с нижним и верхним валками.

При моделировании процесса асимметричной прокатки оценивали влияние рассогласования скоростей валков Δv = 10...90 %, коэффициента трения μ = 0,05...0,4 и степени деформации ε = 50...70 % на положение нейтральных точек и протяженность кинематических зон.

Результаты моделирования и их обсуждение. При прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков в сравнении с симметричным случаем существенно меняется кинематика очага деформации. С увеличением степени рассогласования скоростей валков относительная длина зоны опережения на контакте с верхним валком, вращающимся с меньшей скоростью, возрастает (рис. 2, *а*). Рост зоны опережения происходит до тех пор, пока степень рассогласования Δv не станет равной степени деформации ε. Однако даже при высоком коэффициенте контактного трения μ = 0,4 протяженность зоны опережения не превышает ≈80 % от длины очага деформации.

Относительная длина зоны опережения на контакте с нижним валком, вращающимся с большей скоростью, снижается (рис. 2, *б*). Уменьшение зоны опережения происходит до тех пор, пока степень рассогласования Δv не станет равной степени деформации ε, т.е. на нижнем валке при $\Delta v = \varepsilon$ на всей длине очага деформации реализуется зона отставания. Дальнейшее увеличение степени рассогласования, когда $\Delta v > \varepsilon$, не приводит к изменению протяженности кинематических зон в очаге деформации.

Таким образом, при $\Delta v < \varepsilon$ реализуется общий случай асимметричной прокатки, когда в очаге деформации имеются две кинематические зоны — отставания и опережения, но протяженности этих зон со стороны верхнего и нижнего валков неодинаковы.

При $\Delta v = \varepsilon$ реализуется полупредельный случай асимметричной прокатки, когда на верхнем валке имеются две зоны — отставания и опережения, а на нижнем валке только зона отставания.

При максимальном трении, когда касательные напряжения равны пределу текучести на сдвиг, т.е. $\tau = k$, реализуется предельный случай асимметричной прокатки, при котором нейтральные точки принимают крайние положения в очаге деформации и на контакте с верхним валком имеется только зона опережения, а на контакте с нижним — только зона отставания.

Снижение коэффициента трения приводит к уменьшению протяженности зоны опережения на контакте с верхним валком (рис. 3). В частности, при уменьшении коэффициента трения с 0,4 до 0,053...0,060 в зависимости от степени деформации

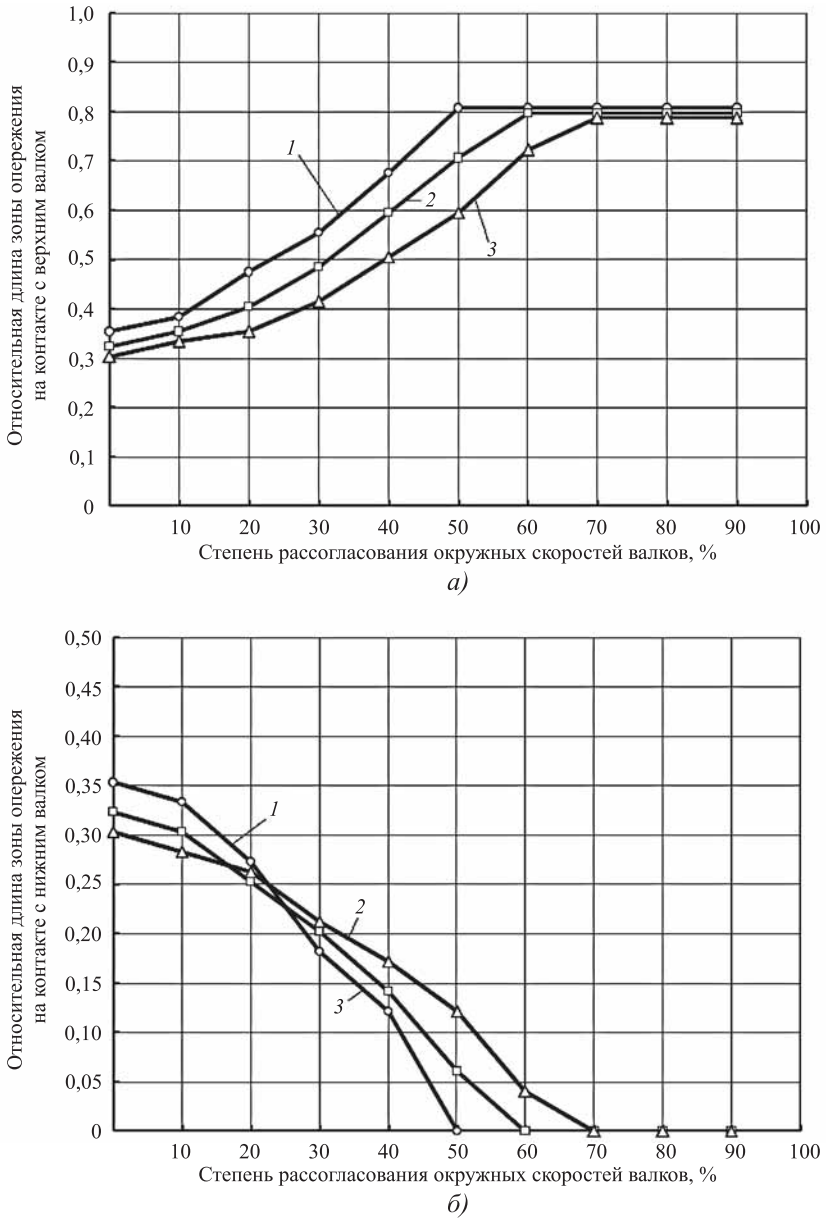


Рис. 2. Изменение длины зоны опережения на контакте с верхним (*а*) и нижним (*б*) валками в зависимости от степени рассогласования окружных скоростей валков Δv и обжатия ε (при μ = 0,4):

1 — ε = 50 %; *2* — ε = 60 %; *3* — ε = 70 %

зона опережения полностью исчезает, и процесс прокатки останавливается. Таким образом, критерием осуществимости процесса асимметричной прокатки с рассогласованием скоростей валков является наличие зоны опережения, как минимум на одном из валков. Данное утверждение справедливо при условии, что оба валка являются приводными.

Характерный вид поля скоростей металла в очаге деформации при симметричной и асимметричной прокатке показан на рис. 4, 5 (см. обложку). При симметричных кинематических условиях скорости течения металла на верхней и нижней дугах контакта одинаковы (рис. 6), поэтому сдвиговые деформации при обычной прокатке невелики или отсутствуют.

Асимметричная прокатка при Δv = ε в сочетании с большим коэффициентом трения (μ = 0,4) и в особенности при максимальном трении (τ = *k*) приводит к существенному различию скоростей течения металла в очаге деформации на контакте с верхним и нижним валками (рис. 7, 8). При этом более высокая скорость течения металла реализуется на контакте с валком, вращающимся с большей скоростью.

Характерной особенностью кинематики процесса является снижение разницы скоростей течения металла на выходе из очага деформации (в точках *B* и *D* на рис. 7). Однако эти скорости не равны между собой, что проявляется в вертикальном изгибе полосы при асимметричной прокатке. Снижение коэффициента трения с 0,4 до 0,06 приводит, с одной стороны, к абсолютному уменьшению скоростей течения металла на контакте с нижним и верхним валками (рис. 9). С другой стороны, уменьшается и относительная разница скоростей течения металла. В частности, при μ = 0,06 и Δv = 50 % скорости течения металла на контакте с нижним и верхним валками практически одинаковы (см. рис. 9), что связано с уменьшением протяженности зоны опережения на верхнем валке.

При асимметричной прокатке относительная разница скоростей течения металла на контакте с нижним и верхним валками определяет деформацию сдвига, которая характеризуется тангенсом угла φ (рис. 10, см. обложку). Поэтому при прокатке с большим рассогласованием скоростей валков, но при малом коэффициенте трения, когда скорости течения металла на контакте с нижним и верхним валками практически одинаковы (см. рис. 9), а протяженность зоны опережения не превышает 20 % (см. рис. 3), деформации сдвига в материале полосы практически отсутствуют (рис. 11, см. обложку).

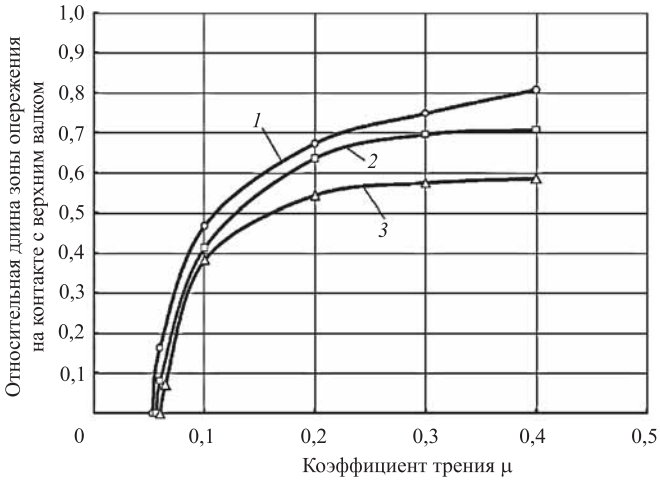


Рис. 3. Изменение длины зоны опережения на контакте с верхним валком в зависимости от коэффициента трения и степени деформации при асимметричной прокатке (Δv = 50 %):

1 — ε = 50 %; *2* — ε = 60 %; *3* — ε = 70 %

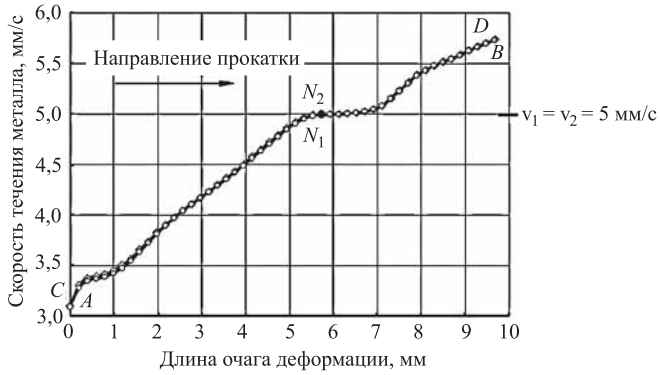


Рис. 6. Скорость течения металла на контакте с нижним и верхним валками при симметричной прокатке (ε = 50 %; μ = 0,4)

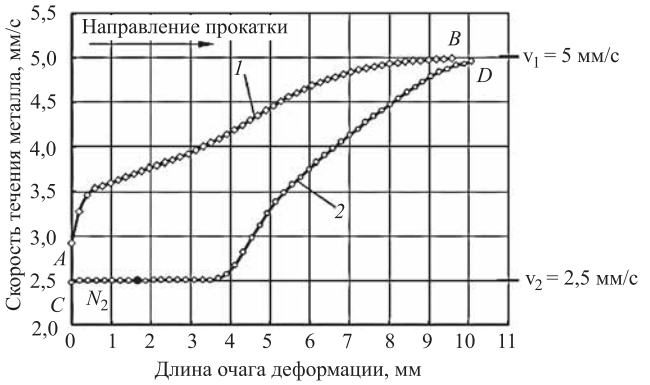


Рис. 7. Скорости течения металла на контакте с нижним (*1*) и верхним (*2*) валками при асимметричной прокатке (Δv = 50 %; ε = 50 %; μ = 0,4)

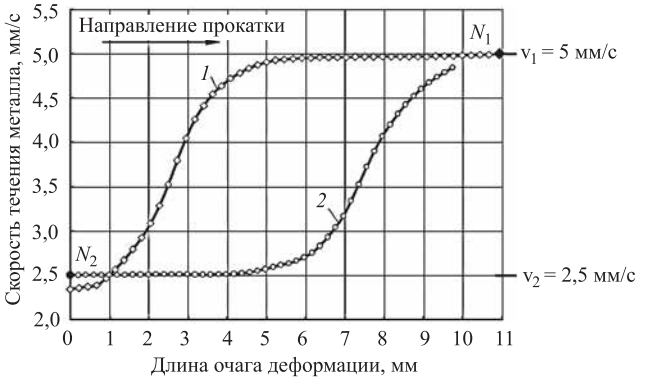


Рис. 8. Скорости течения металла на контакте с нижним (*1*) и верхним (*2*) валками при асимметричной прокатке (Δv = 50 %; ε = 50 %; τ = *k*)

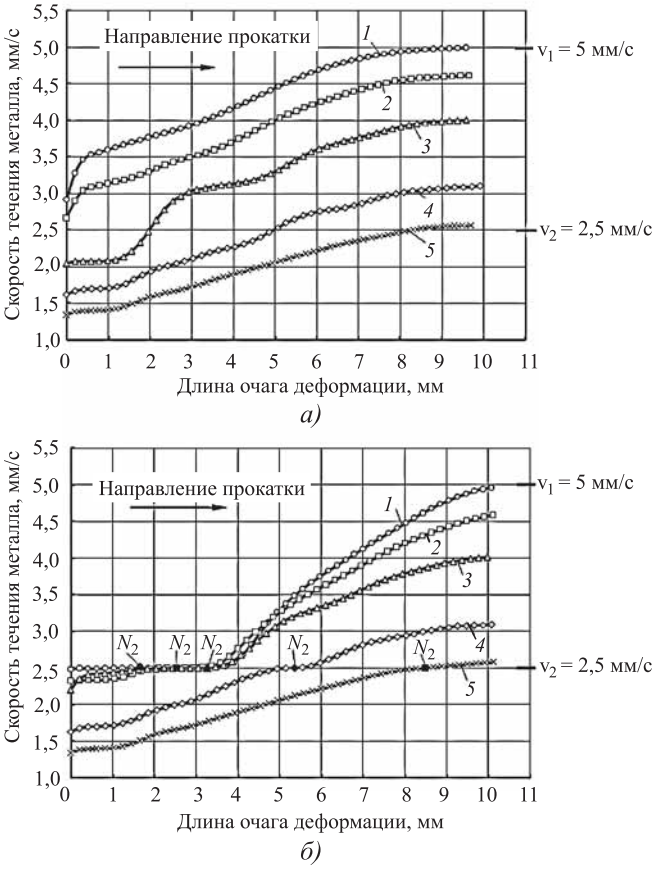


Рис. 9. Скорость течения металла на контакте с нижним (*а*) и верхним (*б*) валками при асимметричной прокатке с различным коэффициентом трения (Δv = 50 %; ε = 50 %):

1 — μ = 0,4; *2* —0,3; *3* —0,2; *4* — 0,1; *5* — 0,06

Таким образом, возможность реализации процесса асимметричной прокатки в режиме ИПД определяется кинематикой течения металла в очаге деформации. Только сочетание высокой степени рассогласования скоростей валков и большого контактного трения в полупредельном

или предельном случаях асимметричной прокатки позволяет создать в материале интенсивные сдвиговые деформации, способствующие измельчению структуры. Данный процесс перспективен для обработки деформируемых термически неупрочняемых алюминиевых сплавов в целях повышения их прочностных свойств.

Выводы

1. С увеличением степени рассогласования скоростей валков длина зоны опережения на контакте с валком, вращающимся с меньшей скоростью, возрастает, а на контакте с валком, вращающимся с большей скоростью, снижается до тех пор, пока степень рассогласования Δv не станет равной степени деформации ε. Дальнейшее увеличение степени рассогласования, когда $\Delta v > \varepsilon$, не приводит к изменению протяженности кинематических зон в очаге деформации.

2. При $\Delta v < \varepsilon$ реализуется общий случай асимметричной прокатки; при $\Delta v = \varepsilon$ реализуется полупредельный случай асимметричной прокатки; при максимальном трении, когда касательные напряжения равны пределу текучести на сдвиг, т.е. $\tau = k$, реализуется предельный случай асимметричной прокатки.

3. Критерием осуществимости процесса асимметричной прокатки с рассогласованием скоростей валков является наличие зоны опережения, как минимум на одном из приводных валков.

4. При асимметричной прокатке относительная разница скоростей течения металла на контакте с нижним и верхним валками определяет деформацию сдвига, поэтому только сочетание высокой степени рассогласования скоростей валков и большого контактного трения в полупредельном или предельном случаях асимметричной прокатки позволяет создать в материале интенсивные сдвиговые деформации, способствующие измельчению структуры.

5. Процесс асимметричной тонколистовой прокатки перспективен для обработки деформируемых термически неупрочняемых алюминиевых сплавов в целях повышения их прочностных свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Peter V. Liddicoat, Xiao-Zhou Liao, Yonghao Zhao et al.** Nanostructural hierarchy increases the strength of aluminum alloys // Nature Communications. 2010. Vol. 63. P. 1—7.
2. **Ji Y.H., Park J.J.** Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes // Materials Science and Engineering: A. 2009. Vol. 499. P. 14—17.
3. **Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J. et al.** Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling // Mechanical Engineering. 2012. Vol. 56. P. 111—115.
4. **Mechanical** properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling / Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan // Scripta Materialia. 2009. Vol. 60. P. 905—908.
5. **Lorentz, Young Gun Ko.** Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling // Journal of Alloys and Compounds. 2012. Vol. 536S. P. S122—S125.
6. **Cui Q., Ohori K.** Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling // Materials Science and Technology. 2000. Vol. 16. P. 1095—1101.
7. **Zuo F., Jiang J., Shan A.** Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008. Vol. 18. P. 774—777.
8. **Песин А.М.** Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки: дис.... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2003. 395 с.
9. **Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A. et al.** Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 32—40.
10. **Pesin A., Pustovoytov D.** Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 622—623. P. 929—935.

Александр Моисеевич Песин, д-р техн. наук,
pesin@bk.ru;
Денис Олегович Пустовойтов, канд. техн. наук

УДК 621.778

А.А. Мышечкин, А.В. Минин
(Московский технологический университет (МГУПИ))

Опыт производства стальной проволоки для производства метизных изделий

На основе производственного опыта и результатов исследований дан анализ требований к исходной заготовке для производства проволоки для различных метизных изделий, технологии подготовки ее поверхности к волочению. Приведены рекомендации для выбора заготовки, подготовки ее поверхности, разработке технологических процессов для отдельных видов проволоки: проволоки стальной для производства дюбелей, проволоки стальной углеродистой для холодной высадки, фасонной проволоки при волочении ее в роликовых волоках.

Ключевые слова: катанка; волочение; проволока; качество; термическая обработка; прочность; механические свойства.

The analysis of requirements to primary part for the production of wire for various of hardware items, its surface preparation techniques for drawing is given on the basis of production experience and the research results. Recommendations for selection of blank part, preparation of its surface, the development of manufacturing methods for certain types of wire: steel wire for the manufacture of plugs, carbon steel wire for cold heading, shaped wire at drawing it into roller dies.

Keywords: wire rod; drawing; wire; quality; heat treatment; strength; mechanical properties.

Основными видами стальной проволоки являются стальная низкоуглеродистая проволока общего назначения, проволока стальная углеродистая для холодной высадки, сварочная проволока, проволока стальная канатная, проволока пружинная, проволока стальная для производства дюбелей.

Материалом для производства стальной проволоки служит катанка или бунтовой сортовой прокат. Минимальный диаметр катанки, производимой на отечественных предприятиях черной металлургии составляет 5,0 мм, наиболее массовый — 5,5 и 6,5 мм.

В последние годы на предприятиях — изготовителях катанки — наметилась тенденция к применению ускоренного охлаждения катанки и снижению температуры окончания прокатки с 1050...1100 до 550...600 °С. Это оказывает существенное влияние на механические свойства катанки и количество окалины на поверхности катанки.

Анализ механических свойств катанки показал, что ускоренное охлаждение и снижение температуры окончания прокатки повышают предел прочности от 290...350 до 450...500 МПа. Количество окалины при этом уменьшается от 25...30 до 6...7 кг на тонну катанки, что значительно облегчает процесс ее удаления и снижает потери металла. Изменяются также свойства окалины. Для повышения пластичности металла используют микродобавки бора и разупрочняющую термомеханическую обработку.

Свойства катанки существенно влияют на свойства получаемой проволоки, технологический процесс ее получения (число переходов волочения, наличие или отсутствие отжигов и т.д.), на подготовку ее к волочению (расход кислоты и длительность травления при кислотной подготовке поверхности, возможность удаления окалиноломанием при бескислотной подготовке).

Поэтому при выборе исходной заготовки для производства проволоки, технологии подготовки ее поверхности к волочению необходимо учитывать назначение проволоки (проволока общего назначения, для холодной высадки, сварочная и т.д.), а также технологические особенности производства заготовки на различных предприятиях-изготовителях. Правильный выбор исходной заготовки позволяет сократить число переходов волочения и число термических обработок.

Например, при производстве проволоки для холодной высадки (ГОСТ 5663) желательно использовать кислотную подготовку поверхности заготовки перед волочением. При про-

изводстве сварочной проволоки (ГОСТ 2246) нельзя применять в качестве подсмазочного слоя известковое покрытие, так как известь является сильным диэлектриком. При термической обработке проволоки для производства дюбелей необходимо использовать защитные атмосферы для исключения обезуглероживания поверхностного слоя.

Проволока стальная для производства дюбелей. Дюбели (дюбель-гвозди, дюбель-винты) предназначены для крепления деталей, оборудования к кирпичным, бетонным, железобетонным конструкциям и элементам зданий и сооружений. В настоящее время область применения дюбелей расширяется. Технологический процесс изготовления дюбелей включает в себя контроль исходного материала, волочение проволоки, холодную высадку заготовки дюбеля, формирование острия дюбеля, продольное рифление стержня и накатку резьбы, изотермическую закалку дюбелей, цинкование.

Дюбели производят из стали 70 класса ВК или КК по ТУ 14-4-1731—92, ТУ 14-4-1844—99. Твердость дюбелей должна составлять 53...56 HRC.

Заготовкой для производства дюбелей является холоднотянутая проволока из стали 70 с содержанием углерода 0,67...0,75 %. Временное сопротивление разрыву должно быть в интервале 600...850 МПа. Микроструктура проволоки должна содержать не менее 80 % зернистого перлита, а также 10...20 % пластинчатого перлита. Глубина обезуглероженного слоя не должна превышать 0,1 мм на сторону.

Для получения заданных механических свойств заготовка подвергается калибровке после отжига со степенью деформации 10...15 %.

Анализ показал, что по однородности свойств ускоренно-охлажденная с прокатного нагрева сорбитизированная катанка уступает по однородности свойств катанке классического патентирования. Это повышает требования к технологическому процессу получения проволоки для производства дюбелей, который включает в себя операции волочения проволоки, а также операции по подготовке структуры проволоки и ее поверхности.

Статистический анализ прочностных характеристик, полученных при испытаниях проволоки, используемой для производства дюбелей, показал, что большой разброс предела прочности проволоки различных диаметров связан с неоднородностью химического состава по углероду. При этом наличие в структуре отожженной проволоки повышенного содержания пластинчатого перлита не приводит к существенным отклонениям значений предела прочности от интервала, заданного техническими условиями.

Холодная высадка заготовки дюбеля включает в себя отрезку заготовки, двухударную высадку на холодновысадочном оборудовании (двухударные прессы "Сасма"-SP11, "Hilqeland" CH2L, автоматы А-121, АА-1218 и др.). При этом при высадке могут возникать дефекты в виде трещин на головке, царапин на стержнях, неравномерное распределение металла в головке. Поэтому процесс непрерывно контролируется и при появлении дефекта проверяют механические характеристики проволоки, равномерность нанесения смазки.

После холодной высадки проводят формирование острия дюбелей на острильном автомате или ротационно-ковочной машине, продольное рифление стержня, изотермическую закалку, цинкование.

Целью изотермической закалки дюбелей является получение изделий со структурой нижнего бейнита, обеспечивающего оптимальное сочетание высокой прочности и вязкости готовых изделий. Нижний бейнит является продуктом изотермического распада аустенита. При этом бейнитное превращение происходит в определенном интервале температур.

При увеличении содержания в стали углерода температура начала бейнитного превращения повышается и, наоборот, при уменьшении содержания углерода температура начала бейнитного превращения — снижается.

На основе обобщений опыта производства и исследований качества дюбелей рекомендуется следующий режим изотермической закалки дюбелей: нагрев на конвейерной ленте до 820...850 °С, выдержка около 40 мин и охлаждение в соляной ванне с температурой около 280 °С в течение 25...30 мин.

Термообработанные дюбели подвергают контролю на твердость, испытанию ударной нагрузкой или на статический изгиб.

Проволока стальная углеродистая для холодной высадки (ГОСТ 5663). Эта проволока предназначена для изготовления изделий, получаемых холодной высадкой (болты, винты, заклепки, гайки, шурупы и т.д.). К ней предъявляют высокие требования по качеству поверхности, точности размеров, механическим свойствам, микроструктуре металла, упаковке и хранению.

Проволока холодной высадки производится диаметром 1,0...6,0 мм. Номинальный диаметр проволоки должен соответствовать ряду *R*40 по ГОСТ 2771—81. Однако по требованию заказчика допускается выпускать проволоку промежуточных размеров, кратных 0,05 мм.

По точности изготовления проволока бывает нормальной и повышенной точности — П (для нее предельные отклонения не должны превышать −0,05 мм). При этом овальность не должна превышать половины предельного отклонения по диаметру.

Проволоку холодной высадки изготовляют из стали марок 08, 08кп, 10, 10кп, 15, 15кп, 20, 20кп, 25, 30, 35, 40, 45 по ГОСТ 10702—78.

На поверхности проволоки не допускаются плены, трещины, закаты, расслоения, волосовины.

По временному сопротивлению проволоку подразделяют на проволоку первого и второго классов. Так, проволока 1-го класса из сталей 10 и 10кп должна иметь $\sigma_в$ = 440...590 МПа (45...60 кгс/мм^2), а относительное сужение при разрыве — не менее 50 %.

Более полное представление о пластических свойствах металла проволоки дают испытания на осадку. Образец из проволоки для холодной высадки должен выдерживать осадку в холодном состоянии без разрушения до 1/2 высоты первоначального образца (проволока высшей категории качества должна выдерживать осадку до 1/3 высоты). По согласованию потребителя с изготовителем проволока может поставляться с условием осадки до 1/4 высоты. Иногда эти испытания обозначают так: сталь с группой осадки 50, 66, 75 %.

Как показал производственный опыт, решающее влияние на результаты испытаний на осадку (на пластичность металла) оказывают поверхностные дефекты металла заготовки (катанки): трещины, волосовины, плены. При волочении эти дефекты вытягиваются в длину и в дальнейшем проволока приобретает неоднородность свойств по длине (на одних участках она может выдерживать осадку 66 % и даже 75 %, а на других не выдерживать 50 %) [1].

Высокие требования предъявляют также к макроструктуре и микроструктуре проволоки, а также к глубине обезуглероженного слоя.

В последнее время все большую долю в общем объеме выпускаемых крепежных изделий занимают изделия, для изготовления которых требуется металл с высоким качеством поверхности и механических свойств.

Для устранения поверхностных дефектов на некоторых предприятиях заготовку подвергали поверхностной зачистке (обдирке). Современные способы производства стали позволяют резко повысить качество проката и отказаться от поверхностной зачистки.

Для получения высококачественного и высокопрочного крепежа в последнее время широко применяют сталь 20Г2Р с добавлением в нее кальция (для раскисления) и бора в количестве 0,008...0,012 % (для связывания азота и повышения прокаливаемости стали). Связывание азота в пластичные соединения BN повышает деформируемость металла для холодной высадки крепежных изделий.

Повышению пластичности металла из стали 20Г2Р способствует также применение разупрочняющей термомеханической обработки при температуре 940...960 °С.

На основе опыта производства проволоки для холодной высадки можно сделать следующие рекомендации. Например, при использовании заготовки с высоким качеством поверхности и структуры металла проволоку диаметром 4,4...6,0 мм с группой осадки 50 и 66 % можно протягивать в один переход без промежуточного отжига из катанки диаметром 5,5 и 6,5 мм. При этом необходимо использовать катанку с температурой окончания прокатки не ниже 700 °С и с кислотной подготовкой поверхности.

Для получения более высокой группы осадки, а также для волочения проволоки меньших размеров вначале осуществляют протяжку проволоки промежуточного размера, ее отжиг, травление и подготовку к новому волочению. Далее проводят волочение на окончательный размер (калибровка). При этом важно правильно выбрать размер промежуточного размера, чтобы обжатие при калибровке обеспечивало получение проволоки с заданными по ГОСТ 5663—79 механическими характеристиками.

Проволоку для холодной высадки изготовляют в мотках массой не менее 30 кг и не более 150 кг. Мотки должны быть смазаны слоем смазки и обернуты слоем бумаги, затем слоем полимерной пленки или ткани.

Волочение фасонной проволоки в роликовых волоках. Для волочения фасонной проволоки разных сечений широко применяют волочение через роликовые (вращающиеся) волоки [1]. Через калибр, образованный роликами, можно протягивать профили различного назначения и конфигурации, в том числе и круглую проволоку. Вращение роликов

осуществляется с помощью сил внешнего трения, возникающих при протягивании проволоки. При этом в качестве исходной заготовки используют прокат, по форме и размерам близкий к готовому профилю, круглый прокат, круглую проволоку.

В зависимости от вида получаемого профиля применяют роликовые волоки с числом роликов от 2 до 8.

В работе [2] представлена конструкция роликовой волоки, имеющая широкие технологические возможности за счет обеспечения раздельного синхронного перемещения отдельных групп, например, пар роликов (рис. 1).

Данная роликовая волока состоит из корпуса *1*, внутри которого и соосно с ним установлены основной *2* и дополнительный *3* диски, ползунов *4*, *5*, в которых установлены рабочие ролики *6*, *7* и стержень (вороток) *8* для вращения дисков при перенастройке волоки. С одной стороны дисков *2*, *3*, обращенных к ползунам, выполнена нарезка по спирали Архимеда, по линии, образуемой при наложении равномерного вращения и равномерного движения по радиусу. В корпусе *1* в плоскости, перпендикулярной направлению волочения, выполнены радиальные пазы, в которых установлены ползуны *4*, *5*. С одной из сторон, обращенных к дискам, ползуны также имеют нарезку по спирали Архимеда, взаимодействующую с нарезкой дисков. Позиция *9* — протягиваемое изделие, например труба или сплошной профиль трехгранного, квадратного, шестигранного сечения. Позиция *10* — паз для установки в диски стержня *8*. При этом одни ползуны установлены во взаимодействии с основным ползуном, а другие — с дополнительным. Например, ползуны *4* взаимодействуют с диском *2*, а ползуны *5* — с диском *3*.

При вращении диска *2* синхронно перемещаются только ползуны *4* с роликами *6* (ролики синхронно сходятся или расходятся) и, соответственно, меняется размер *a* протягиваемого изделия. При вращении диска *3* синхронно перемещаются только ползуны *5* с роликами *7* и меняется размер *b* изделия.

Вращая один из этих дисков, можно удалить из корпуса ряд ползунов с роликами и изменить форму получаемого изделия. Например, вращением диска *3* можно удалить три ползуна *5*, а оставшиеся три ползуна после смены роликов могут сформировать трехгранный профиль. Такое изменение профиля протягиваемого изделия возможно даже в процессе волочения, т.е. роликовая волока позволяет получать изделия с переменным сечением по длине.

Для ускорения процесса настройки можно расчетным путем определить требуемый угол поворота диска α для изменения размера получаемого изделия на δ:

$$\alpha = \delta / K,$$

где K — параметр спирали Архимеда.

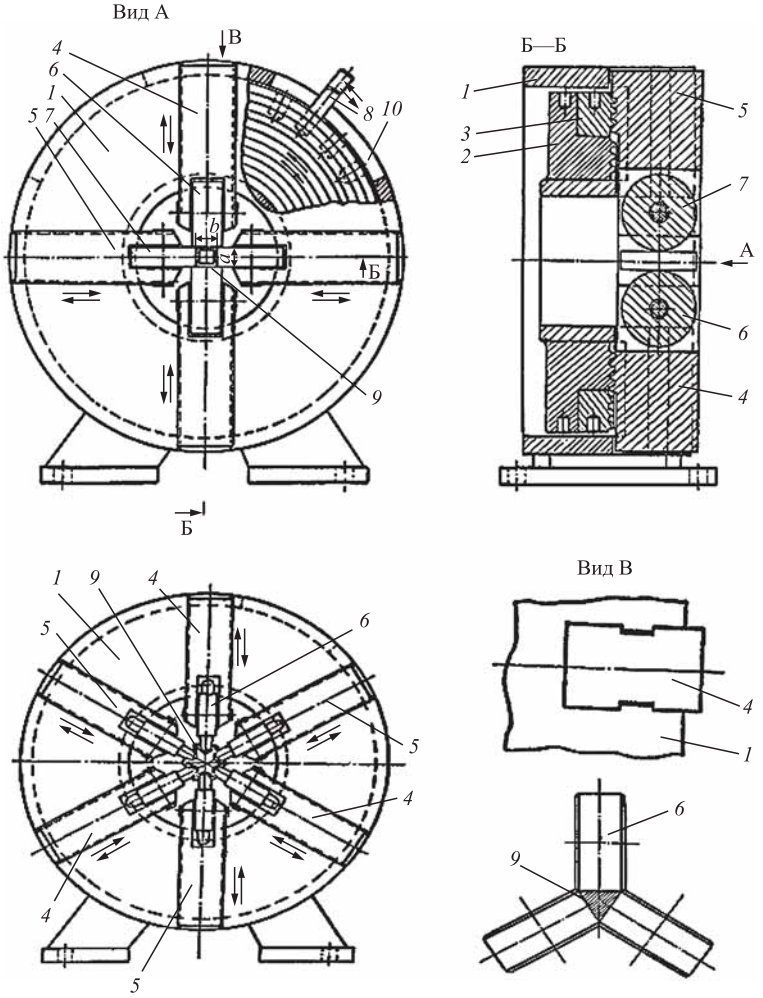


Рис. 1. Роликовая волока

Каждая волока оснащается комплектом основных и запасных ползунов с роликами. Поэтому при перенастройке на другой типоразмер или при выходе роликов из строя вращением дисков все или отдельные ползуны с роликами извлекаются из корпуса волоки и на их место устанавливаются другие.

Роликовые волоки устанавливаются, как правило, на обычных проволочных волочильных станах.

Заключение. Рассмотрены технологические особенности производства различных видов стальной проволоки для метизных изделий. Даны рекомендации по выбору исходной заготовки, подготовке ее поверхности к волочению, разработке технологических параметров, выбору маршрутов волочения, термической обработки различных видов стальной проволоки. Предложена конструкция роликовой волоки для волочения фасонной проволоки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Осадчий В.Я., Мышечкин А.А., Борзенков М.И.** Особенности производства некоторых видов стальной проволоки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 6—2 (296). С. 119—124.

2. **Мышечкин А.А., Осадчий В.Я.** Машины и технология метизного производства. М.: МГУПИ, 2008. 470 с.

Алексей Александрович Мышечкин,
канд. техн. наук, maleksys@rambler.ru;
Андрей Викторович Минин

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ МАШИНОСТРОЕНИЕ

в 40 томах

Энциклопедия содержит в справочном виде основы теории, методы расчета, проектирования и конструирования машин, основные сведения о материалах и технологических процессах.

В ней обобщены передовой опыт и современное состояние научно-технического прогресса в различных отраслях промышленного комплекса с учетом сложившихся мировых тенденций.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И УСТАНОВКИ

ТОМ IV-20

Ю.С. Васильев, В.А. Умов, Ю.М. Исаев и др.;
под ред. **Ю.С. Васильева, Г.П. Поршнева.** — 2015. 584 с.
ISBN 978-5-94275-795-3. ISBN 5-217-01949-2

Цена 3000 р.

Дана характеристика использования гидроэнергетических ресурсов, применяемых типов и схем гидроэнергетических установок. Для лопастных гидравлических машин (турбин, насосов, насос-турбин, гидродинамических передач) и насосов трения (дисковых, вихревых и гидроструйных) рассмотрены основы теории и рабочего процесса, расчета и проектирования элементов проточной части, применяемые и перспективные конструкции машин и агрегатов, режимы работы, характеристики, нагрузки на элементы конструкции, вопросы управления и надежности работы. Изложены методы расчета и конструирования объемных гидромашин наиболее распространенных типов (главным образом, объемных гидравлических насосов), описание их конструкций, характеристик и особенностей эксплуатации.

Для инженеров-расчетчиков, конструкторов, научных сотрудников и эксплуатационного персонала, работающих в области гидромашиностроения, а также может быть полезна студентам, аспирантам и преподавателям высших технических учебных заведений.

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

УДК 669.715:621.78

Ю.А. Пучков, Фам Хонг Фу
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Влияние режимов охлаждения при закалке на структуру и свойства сплавов системы Al—Mg—Si

Исследовано влияние продолжительности выдержки при изотермической закалке на структуру и характеристики твердости, прочности деформируемого термически упрочняемого сплава системы Al—Mg—Si В1341 в состоянии после закалки и искусственного старения. Структура и фазовый состав сплава исследованы методами сканирующей электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального и фрактографического анализа. Построены диаграммы достижения твердости, предела текучести сплава в данном состоянии. Предложена уточненная методика прогнозирования свойств термически упрочненных изделий из этого сплава с использованием закалочного фактора.

Ключевые слова: термически упрочняемые деформируемые алюминиевые сплавы системы Al—Mg—Si; изотермическая закалка; диаграммы достижения свойств; закалочный фактор; прогнозирование твердости и предела текучести изделий.

The influence of interrupted quenching holding time on structure, hardness and yield strength of the precipitation hardening aluminum Al—Mg—Si alloy V1341 after quenching and artificial aging is studied. Structure and phase composition of the alloy are studied by scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray microanalysis and fractography. The isothermal transformation (time—temperature—property) diagrams of hardness and yield strength of the alloy are plotted. The elaborated method for predicting the precipitation hardening aluminum alloy properties using quench factor values is suggested.

Keywords: wrought heat treatable aluminum Al—Mg—Si alloys; isothermal quenching; time—temperature—property diagrams; quench factor; forecasting of hardness and yield strength.

Введение. Деформируемые сплавы системы Al—Mg—Si широко применяют в автомобильной, авиационной промышленности и строительстве. Для этих сплавов характерна высокая технологичность, удельная прочность, надежность и коррозионная стойкость. Снижение их прочности при замедленном охлаждении от температуры закалки связано с образованием сравнительно крупных выделений на поверхности дисперсоида и пор, с образованием зон, свободных от выделений, а также со снижением концентрации магния, кремния, меди и плотности вакансий в твердом растворе после закалки [1].

Применение закалочного фактора позволяет прогнозировать свойства изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов, непрерывно охлажденных по различным режимам от температуры закалки, однако для этого необходимо использовать диаграммы достижения свойств, получаемые с использованием изотермической закалки [2—4].

Целью работы является построение диаграмм достижения предела текучести и твердости для сплава В1341, а также совершенствование методики прогнозирования этих характеристик у термически упрочненных изделий из алюминиевых сплавов.

Материалы и методика проведения исследований. В качестве исследуемого материала выбран лист толщиной 1,4 мм из сплава В1341. Химический состав исследуемого сплава, определенный с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с лазерным возбуждением "ЛАЭС", приведен в табл. 1.

1. Химический состав исследуемого сплава В1341

Mg	Si	Cu	Mn	Cr	Ca	Zn	Fe	Ti
0,64	0,81	0,30	0,26	0,16	—	0,06	0,19	0,07

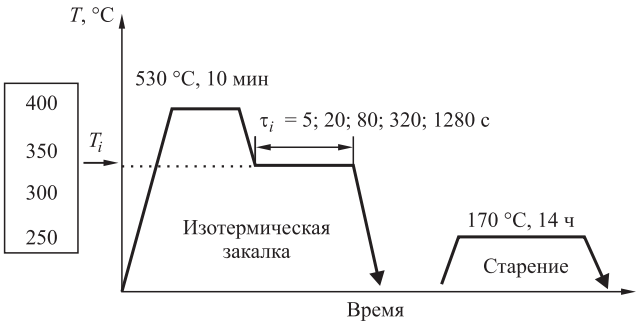


Рис. 1. Схема термической обработки для построения диаграммы достижения свойств

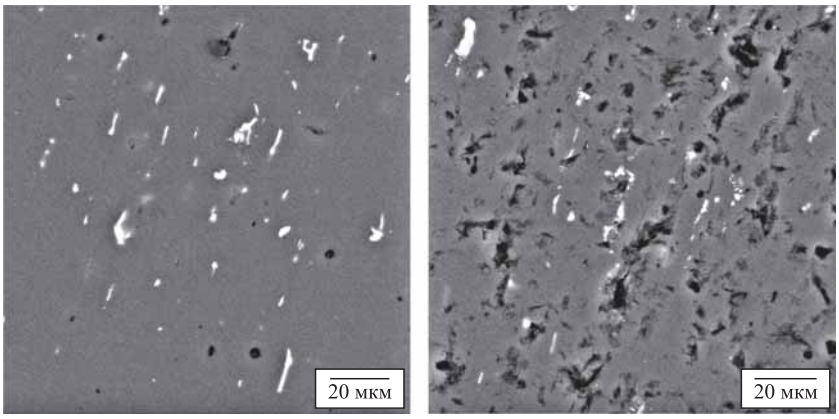
Схема и режимы термической обработки, включающей в себя изотермическую закалку с последующим старением, приведены на рис. 1. При изотермической закалке образцы помещали в соляную печь с температурой 530 °С, выдерживали 10 мин, после этого образцы быстро (за 1...2 с) переносили в соляную ванну второй печи. Соляной расплав состоял из 55 % $NaNO_3$ и 45 % $NaNO_2$. Температуру во второй соляной ванне поддерживали равной одной из температур: 250; 300; 350 и 400 °С, а продолжительность выдержки выбирали равной 5; 20; 80; 320 и 1280 с. После выдержки образцы подвергали старению в воздушной атмосфере при 170 °С в течение 14 ч.

Исследование микроструктуры и элементного состава термически упрочненного сплава выполняли с применением сканирующего микроскопа TESCAN VEGA 2 LMH и энергодисперсионного спектрометра Oxford Instruments INCA Energy. Испытания на разрыв выполняли на плоских образцах с рабочей длиной 40 мм и шириной 6 мм по ГОСТ 1497—84 на испытательной разрывной машине ИР 5047-50 производства ОАО "ТОЧПРИБОР".

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 2 приведена структура сплава после различной продолжительности выдержки при изотермической закалке. При продолжительности изотермической выдержки 5 с наблюдаются только крупные светлые включения дисперсоида. По результатам МРСА включения дисперсоида содержат, % мас.: 75...85 Al; 5...10 Si; 6...11 Fe; 2...5 Mn и являются преимущественно α-фазой. При изотермической выдержке 1280 с наряду с включениями дисперсоида наблюдаются многочисленные выделения, содержащие магний, кремний и медь.

Расчетным методом установлено, что при распаде пересыщенного твердого раствора сплава В1341 во время изотермической выдержки при закалке образуются: зоны ГП (В-фаза), метастабильная когерентная β″-фаза ($Al_2Mg_5Si_4$), метастабильная полукогерентная β'-фаза (Mg_5Si_6), медьсодержащая Q-фаза ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$), а также стабильная некогерентная β-фаза (Mg_2Si) (рис. 3), в результате чего образуются многослойные комплексные включения. При этом доля мелкодисперсных упрочняющих включений, образующихся при старении, уменьшается.

Фрактограммы поверхности разрушения, образовавшейся в результате испытания на разрыв, приведены на рис. 4. При небольшой продолжительности изотермической выдержки (5 с) наряду с трещиной, распространяющейся поперек волокон, образуются боковые трещины, развивающиеся вдоль границ волокон в результате их сдвига относительно друг друга. О разрушении сдвигом свидетельствуют многочисленные неглубокие ямки, различимые только при увеличении 5000 крат. При этом увеличении наблюдаются различия в форме ямок сдвига.



а) *б)*

Рис. 2. Микроструктуры образцов, подвергнутых закалке с изотермической выдержкой различной продолжительности при 350 °С, и последующему искусственному старению при 170 °С, 14 ч:
а — 5 с; *б* — 1280 с

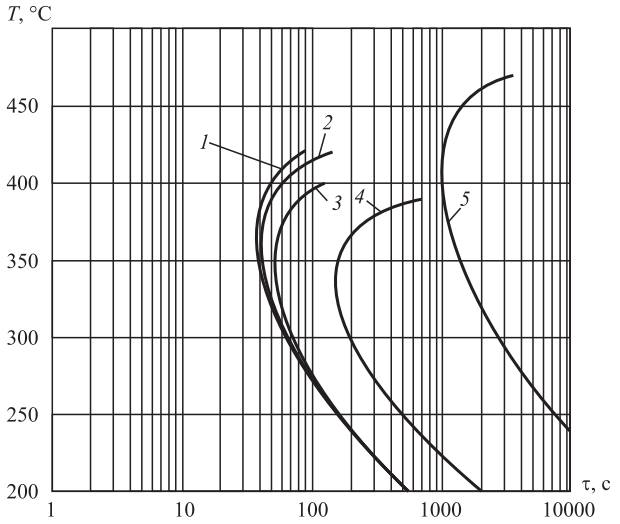


Рис. 3. Диаграмма изотермического распада сплава В1341:
1 — В-фаза; *2* — β″-фаза; *3* — β′-фаза; *4* — Q-фаза; *5* — β-фаза

При повышении продолжительности изотермической выдержки ямки сдвига приобретают вытянутый характер, что, вероятно, связано с изменением формы выделений на пластинчатую и более высокой степенью деформации перед разрушением. Наряду с ямками сдвига на поверхности излома присутствуют и крупные глубокие ямки, сформировавшиеся в результате образования, роста и слияния пор. С увеличением продолжительности изотермической выдержки увеличиваются их диаметр и глубина, края (гребни) становятся более высокими и острыми, что свидетельствует о повышении пластичности сплава.

Прогнозирование механических свойств на основе теории закалочного фактора. Для прогнозирования свойств термически упрочняемых алюминиевых сплавов, выбора охлаждающих сред и режимов охлаждения при закалке в работах [5, 6] предложено использовать закалочный фактор.

В большинстве работ [2, 3, 5, 6] закалочный фактор Q определяют численным методом по уравнению (1) (см. рис. 1), однако более точно его значение может быть определено аналитически по уравнению (2):

$$Q = \sum_{T=T_н}^{T=T_к} \frac{\Delta\tau_i}{\tau_{Ci}} = \int_{T_н}^{T_к} \frac{\frac{\Delta\tau}{\Delta T}\Delta T}{\tau_C}; \qquad (1)$$

$$Q = \int_{T_н}^{T_к} \frac{dT}{v_{охл}\tau_C}, \qquad (2)$$

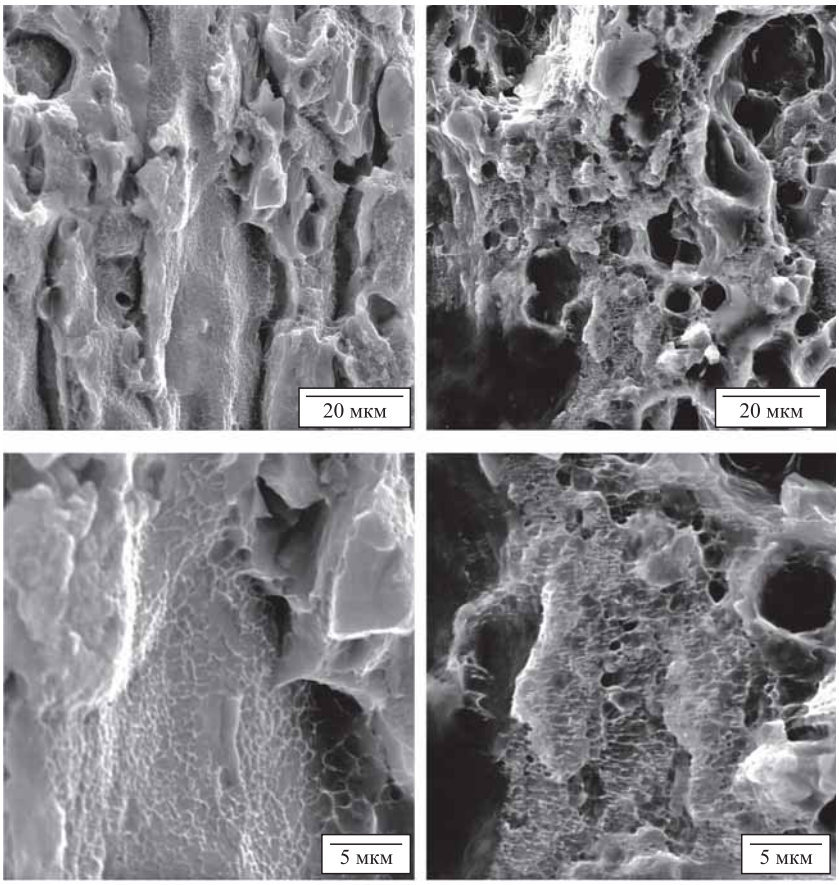
где $T_н$, $T_к$ — температура начала и конца процесса закалки;

τ_C — продолжительность изотермической выдержки, требуемая для достижения значения характеристики, для которого построена диаграмма достижения свойств;

$v_{охл}$ — скорость охлаждения при данной температуре.

Схема определения закалочного фактора по кривой охлаждения и С-образной кривой приведена на рис. 5.

Методика построения диаграмм достижения свойств приведена в



а) *б)*

Рис. 4. Фрактограммы поверхности разрушения в результате испытания на растяжение сплава В1341, подвергнутого закалке с изотермической выдержкой различной продолжительности при 350 °С и последующему искусственному старению при 170 °С, 14 ч:
а — 5 с; *б* — 1280 с

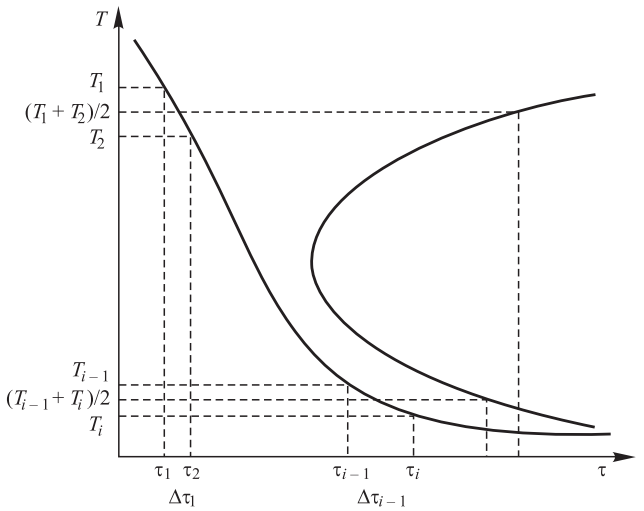


Рис. 5. Схема определения закалочного фактора по кривой охлаждения и С-образной кривой

работах [2, 3, 7], в которых С-образная кривая описывается уравнением

$$\tau_C = -K_1 K_2 \exp\left(\frac{K_3 K_4^2}{RT\left(K_4 - T\right)^2}\right)\exp\left(\frac{K_5}{RT}\right), \quad (3)$$

где $\tau_C(T)$ — время до образования определенной доли выделения, с;

K_1 — коэффициент, равный $\ln(1 - x)$, где x — доля образовавшегося выделения (для сплава, содержащего 0,5 % выделений данного типа, $K_1 = \ln(1 - 0{,}005) = -0{,}00501$);

K_2 — коэффициент, связанный с обратной величиной скорости зародышеобразования, 1/с;

K_3 — коэффициент, связанный с работой образования зародыша, Дж/моль;

K_4 — коэффициент, связанный с температурой растворения выделившейся фазы, К;

K_5 — коэффициент, связанный с энергией активации процесса диффузии, Дж/моль;

R — газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К);

T — температура, К.

Степенной показатель в уравнении Аврами часто выбирают равным 1 [2, 4, 6]. Однако в условиях, когда образование зародышей и рост включений протекают параллельно, степенной показатель в уравнении Аврами равен 2,5 [8]. При распаде пересыщенного твердого раствора благодаря эффекту долгоживущих закалочных вакансий энергия активации процесса образования и эволюции частиц β″-фазы равна 0,58 эВ (55960 Дж/моль) [9], что существенно ниже энергии активации диффузии атомов легирующих элементов в сплаве, содержащем равновесную плотность вакансий. С учетом этого в данной работе коэффициент K_5 был выбран равным 55960 Дж/моль, и были рассчитаны коэффициенты K_2, K_3 (табл. 2).

Диаграммы достижения предела текучести и твердости для сплава В1341 приведены на рис. 6.

2. Значения коэффициентов, характеризующих сплав В1341

Параметр	K_2, 1/с	K_3, Дж/моль	K_4, К	K_5, Дж/моль
$\sigma_{0,2}$	0,0029	150	803	55 960
HV20	0,0025	250	803	55 960

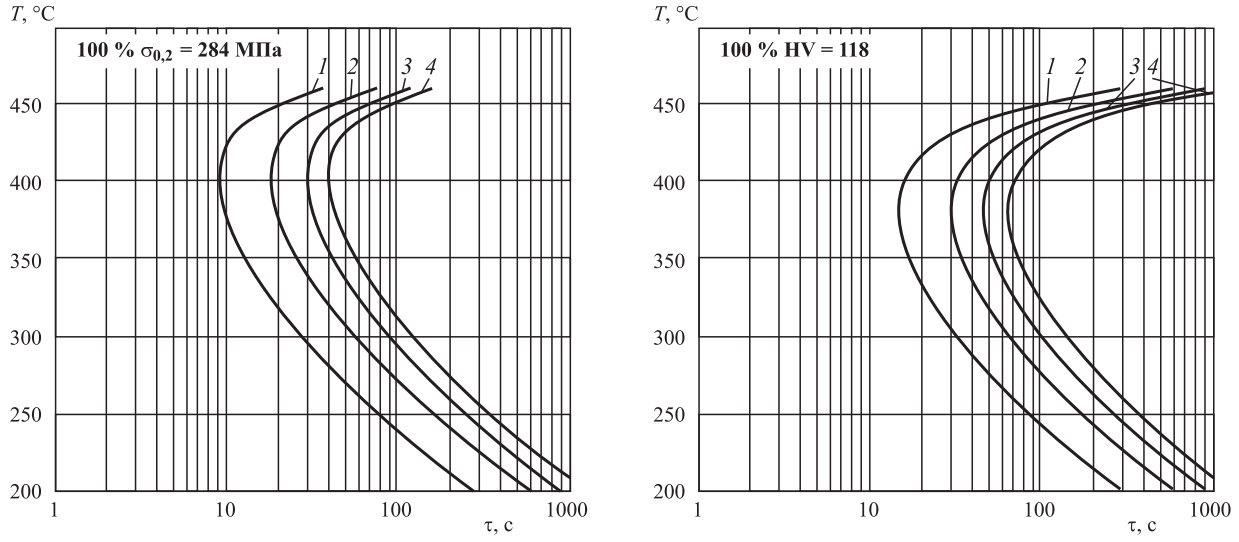


Рис. 6. Диаграммы достижения 95 (*1*), 90 (*2*), 85 (*3*) и 80 % (*4*) предела текучести $\sigma_{0,2}$ и твердости HV сплава В1341, построенные методом изотермической закалки

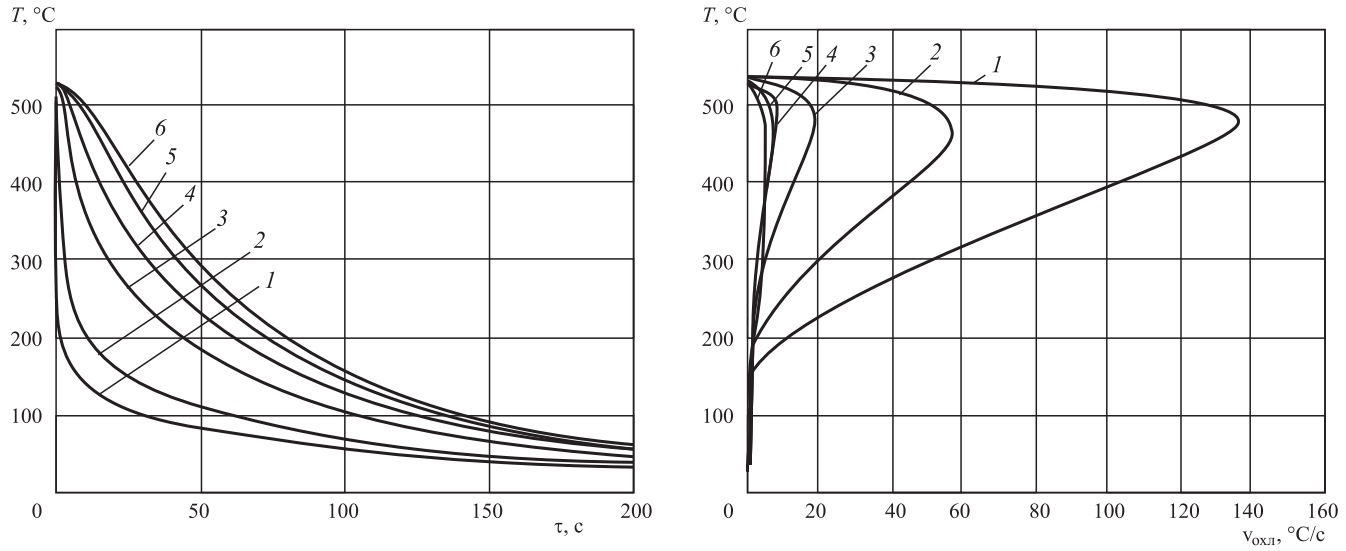


Рис. 7. Кривые охлаждения для точек образца на различных расстояниях от охлаждаемого торца:
1 — 5 мм; *2* — 11 мм; *3* — 32 мм; *4* — 50 мм; *5* — 68 мм; *6* — 99 мм

Для прогнозирования твердости и предела текучести использовали следующие уравнения:

$$\frac{\mathrm{HV} - \mathrm{HV}_{\min}}{\mathrm{HV}_{\max} - \mathrm{HV}_{\min}} = \left(\exp\left(-K_1 Q\right)\right)^{2,5}; \qquad (4)$$

$$\frac{\sigma_{0,2} - \sigma_{0,2\min}}{\sigma_{0,2\max} - \sigma_{0,2\min}} = \left(\exp\left(-K_1 Q\right)\right)^{2,5}. \qquad (5)$$

Проверку результатов прогнозирования проводили с применением метода торцевой закалки. С этой целью использовали стандартный образец в виде прямоугольного параллелепипеда из сплава В1341 с размерами 30×30×100 мм, имеющий цилиндрическую выточку в зоне контакта со струей воды. Результаты моделирования процесса охлаждения в воде, полученные с использованием Ansys, представлены на рис. 7.

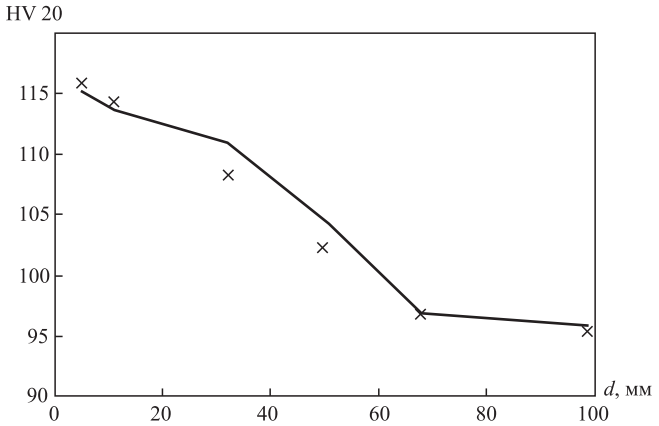


Рис. 8. Зависимости расчетных и экспериментальных (×) значений твердости от расстояния *d* до охлаждаемой поверхности образца

Скорости охлаждения в разных точках образца аналитически описывали полиномом четвертой степени:

$$v_{охл} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4.$$

Рассчитанные по уравнениям (1), (2) и экспериментальные значения твердости приведены на рис. 8.

Выводы

1. Построены диаграммы достижения твердости и условного предела текучести сплава В1341 после термической упрочняющей обработки, включающей в себя закалку и искусственное старение.

2. Для увеличения точности построения диаграмм достижения свойств и результатов прогнозирования свойств термоупрочненых изделий предложено использовать значение энергии активации диффузии для сплава с закалочными вакансиями, равное 55960 Дж/моль, и уточненное, равное 2,5, значение экспоненциального коэффициента в уравнении Аврами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Колобнев Н.И., Бер Л.Б., Хохлатова Л.Б.** Структура, свойства и применение сплавов системы Al—Mg—Si—(Cu) // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 9. С. 40—45.

2. **Пучков Ю.А., Фам Хонг Фу.** Построение диаграмм достижения свойств термически упрочняемых алюминиевых сплавов методом торцевой закалки // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 3. С. 33—38.

3. **Влияние** скорости охлаждения при закалке на структуру и свойства сплава В91Т3 системы Al—Zn—Mg—Cu / Ю.А. Пучков, Ван Яньлун, С.Л. Березина, С.А. Прудиус, В.С. Шмелева, А.Ю. Ампилогов // Технология металлов. 2010. № 8. С. 15—21.

4. **Прогнозирование** свойств деталей из сплава В91Т3 системы Al—Zn—Mg—Cu / Ю.А., Пучков Ван Яньлун, С.А. Герасимов, Г.Г. Мухин, С.П. Щербаков, В.А. Ларкин // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 8. С. 37—42.

5. **Staley J.T., Doherty R.D., Jaworski A.P** // Metal Trans. 1993. № 24A. P. 2417—2427.

6. **Staley J.T., Tiryakioglu M.** Use of TTP Curves and Quench Factor Analysis for Property Prediction in Aluminum Alloys: in Materials Solutions Conference. 2001. Indianapolis, IN: ASM International. P. 6—15.

7. **Bates C.E., Totten G.E.** Application of Quench Factor Analysis to Predict Hardness under Laboratory Production Conditions: in First International Conference on Quenching & Control of Distortion. 1992. Chicago, IL. P. 33—39.

8. **Rometsch P.A., Starink M.J., Gregson P.J.** Improvements in quench factor modeling // Materials Science and Engineering. 2003. A339. P. 255—264.

9. **Васильев А.А., Кузьмин Н.Л., Груздев А.С.** Исследование кинетики образования метастабильных фаз в закаленных сплавах Al—Mg—Si // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. Вып. 8. С. 1576—1581.

Юрий Александрович Пучков, канд. техн. наук,
Putchkov_bmstu@mail.ru;
Фам Хонг Фу

УДК 620.179.118.2/621.89/681

А.Н. Петров, Б.А. Логинов*, М.А. Петров
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ),
** Национальный исследовательский университет "МИЭТ")*

Исследование шероховатости и толщины теплозащитных покрытий для заготовок из никелевых сплавов

Приведены результаты исследований шероховатости и толщины защитных покрытий с помощью профилометра мод. 130. Исследованы два вида покрытий: на основе коллоидного графита и алюмосиликатов. Покрытия предназначены для защиты от окисления заготовок лопаток из никелевых сплавов в процессе нагрева под последующее деформирование (выдавливание, штамповка).

Ключевые слова: теплозащитные покрытия; коллоидный графит; алюмосиликаты; никелевые сплавы; лопатки; профилометр; шероховатость поверхности; толщина покрытия; выдавливание; штамповка.

The current study aims to obtain the quality information about the roughness and thickness of the protective coatings, used for prevention the oxidation of the surface of the workpieces made from Ni-based alloys during their heating before forging or extrusion operation by profilometer of the model 130. Two types of coating are studied: colloidal-graphite-based and alumosilicate-based.

Keywords: thermal protective coatings; colloidal graphite; alumosilicates; Ni-based alloys; compressor blades; profilometer; surface roughness; coating thickness; extrusion; forging.

Введение. Применение и выбор эффективных смазочных материалов и теплозащитных покрытий для технологических процессов горячего деформирования лопаток газотурбинного двигателя является актуальной проблемой, решение которой позволяет значительно повысить их качество.

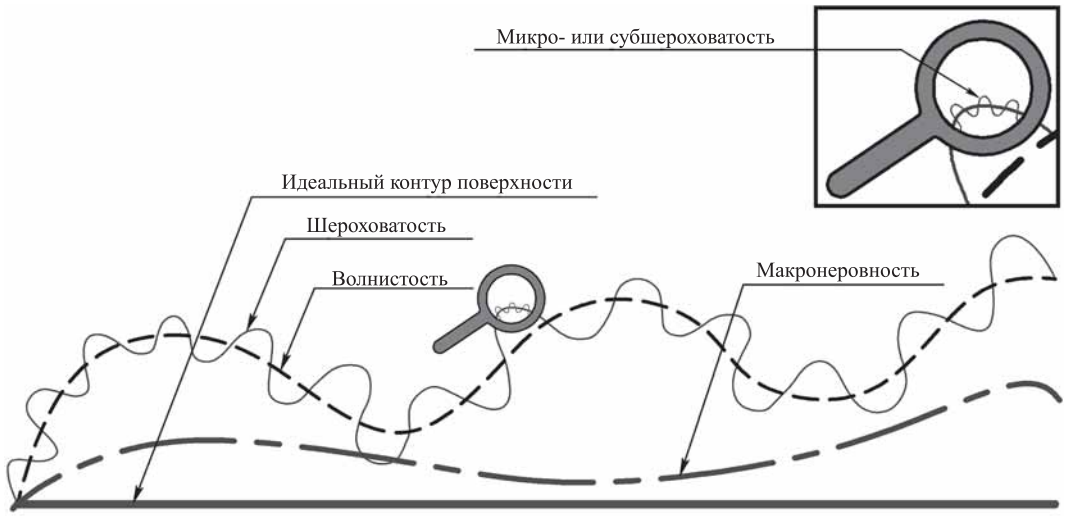
При нагреве заготовок из жаропрочных или никелевых сплавов в воздушной атмосфере на поверхности образуется окалина, а также происходит окисление по границам зерен и обеднение поверхности легирующими элементами. Дефектный слой состоит из зоны оксидов металла, зоны окисленных границ зерен и зоны с измененным химическим составом. Глубина дефектного слоя оказывает большое влияние на величину назначаемого припуска поковок. Поэтому теплозащитные покрытия не должны вступать в реак-

цию с основным металлом в процессе нагрева [1]. В качестве теплозащитных покрытий применяют защитные эмали, суспензии стекол или расплав солей хлористого бария.

Защитные эмали и стеклянные суспензии, которые наносятся на заготовку, имеют две функции: теплозащитную и смазочную. Как смазка штампов они проявляют себя только в жидком состоянии. При температурах штампов 150...180 °С эмали или суспензии стекла в состоянии отвердения работают как абразив на поверхности штампов. Нагрев заготовок в расплаве солей хлористого бария сопровождается недостатками, исследованными в работе [2]. Покрытия на основе коллоидного графита создают условия граничного трения на контактной поверхности заготовка—штамп и позволяют снизить трение и износ штампов [3].

Теплозащитные покрытия наносятся на заготовки, как правило, методом окунания. При этом немаловажное значение имеет толщина полученного слоя покрытия на заготовке. Измерение толщины слоя покрытия представляет собой сложную задачу, поскольку покрытия хрупкие и в процессе их высыхания после нанесения могут осыпаться.

Известно, что топография поверхности материала (с покрытием или без него) в общем случае характеризуется следующими параметрами, которые отличают ее от поверхности идеальной формы: макронеровности, волнистость, шероховатость, микро- или субшероховатость (рис. 1) [4]. Измерение данных параметров одним методом является трудновыполнимой задачей, однако существуют приборы, позволяющие измерять несколько из указанных выше параметров.



а)

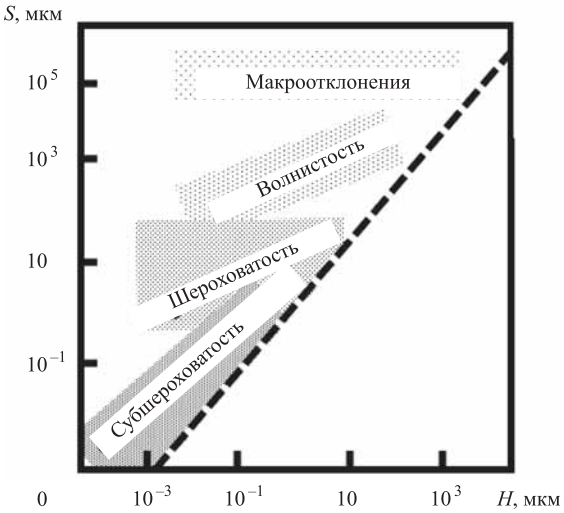


Рис. 1. Описание топографии поверхности металлических образцов с покрытием через параметры (*а*) и области их определения (*б*):

S — расстояние между неровностями; *H* — высота неровностей

1. Физические свойства исследуемых покрытий

Показатель	Номер образца покрытия*	
	№ 29/1	№ 30/2
Массовая доля сухого остатка, %	29,42	38,46
Плотность, кг/м^3	1227	—
Концентрация ионов водорода, pH	10,61	11,25
Потери при прокаливании, %, при температуре, °С:		
600	37,91	9,17
800	49,94	10,18
Условная вязкость, с (при разбавлении концентрата)	13,8 (75 %)	13,0 (50 %)
Внешний вид	Густая подвижная суспензия черного цвета	Густая подвижная суспензия серого цвета

*Образцы покрытий предоставлены ООО "Коллоидно-графитовые препараты" (г. Воскресенск).

Экспериментальные исследования. Применяли профилометр мод. 130, предназначенный для измерений параметров профиля и шероховатости по системе средней линии по ГОСТ 25142—82. Профилометр мод. 130 — это профессиональная модель первого класса точности. Прибор разработан в России в соответствии с ТУ 3943-001-70281271 и внесен в Госреестр средств измерений (№ 33319-13).

Профилометр мод. 130 измеряет 28 параметров шероховатости и 4 параметра волнистости наружных и внутренних поверхностей с прямым или изогнутым сечением. Чувствительность индуктивного датчика профилометра составляет 0,002 мкм, что позволяет описывать рельеф неровностей высотой от 0,005 мкм.

Исследовали два основных вида покрытий: водную суспензую на основе коллоидного графита и водную суспензию на основе алюмосиликатов. В табл. 1 приведены физические свойства покрытий. Полученные результаты по шероховатости и толщине покрытий были сравнены с коммерческим покрытием Condaero 228, предоставленным МТЦ "Политег-МЕТ" (г. Москва).

Подготовку покрытий проводили путем разбавления в соотношении 1:1 (концентрация 50 %). Образцы покрытий наносили на поверхность на половину высоты цилиндрических заготовок из никелевого сплава. Заготовки предварительно прошли операцию удаления заусенцев на галтовочных машинах фирмы ROSLER (Германия). Общий вид образцов с покрытиями показан на рис. 2.

Методика исследования заключалась в следующем:

Рис. 2. Образцы с нанесенными покрытиями

1. Получение информации по профилю покрытия через оценку его шероховатости *Rz*.

2. Получение информации по профилю базовой поверхности детали, на которой нет покрытия, оценка *Rz*.

3. Получение информации по профилю перехода с покрытия вниз в бороздку на базовую поверхность детали, оценка толщины покрытия *z*.

Действие профилометра мод. 130 основано на принципе ощупывания неровностей измеряемой поверхности щупом (зондом) в процессе перемещения индуктивного датчика вдоль измеряемой поверхности и последующего преобразования, возникающих при этом механических колебаний щупа в цифровой сигнал.

Использование стандартного зонда с радиусом 10 и 20 мкм разрушает покрытие. Поэтому разработали специальную эллиптическую заточку зонда: передний радиус зонда 20 мкм, которым наезжает на поверхность покрытия, а задний радиус зонда 40 мкм, которым он спускается с поверхности покрытия. Эллиптический зонд не разрушал поверхность покрытия в процессе исследований и позволил получить точные результаты измерений параметра шероховатости поверхности и толщины покрытия.

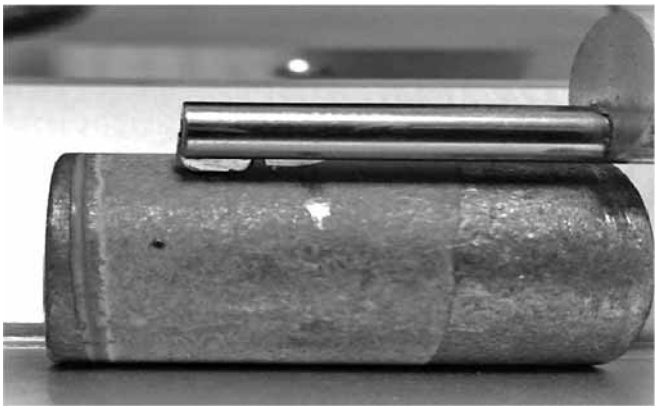
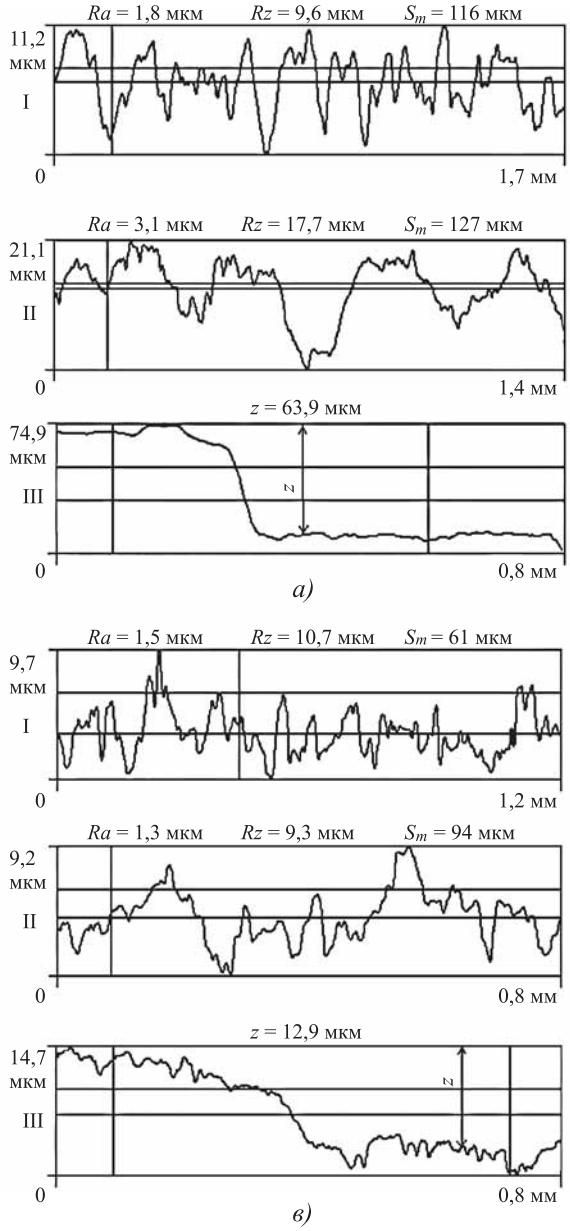


Рис. 3. Эллиптический зонд при ощупывании поверхности исследуемой заготовки с покрытием

На рис. 3 показан эллиптический зонд на поверхности заготовки с покрытием. В начале выполнения исследований на поверхности заготовок в зоне покрытия делали небольшую риску, относительно которой начиналось перемещение зонда по поверхности.

Обсуждение результатов. Анализ результатов, представленных в табл. 2, показал, что образец № 29/1 на основе коллоидного графита обеспечивает хорошую адгезию с поверхностью исходной заготовки и создает на ее поверхности ровное плотное покрытие толщиной 63,9 мкм и с параметром шероховатости Rz = 9,6 мкм (рис. 4, *а*).

Образцы № 30/2 и № 228 Condaero на основе алюмосиликатов имеют удовлетворительную адгезию с поверхностью исходной заготовки.



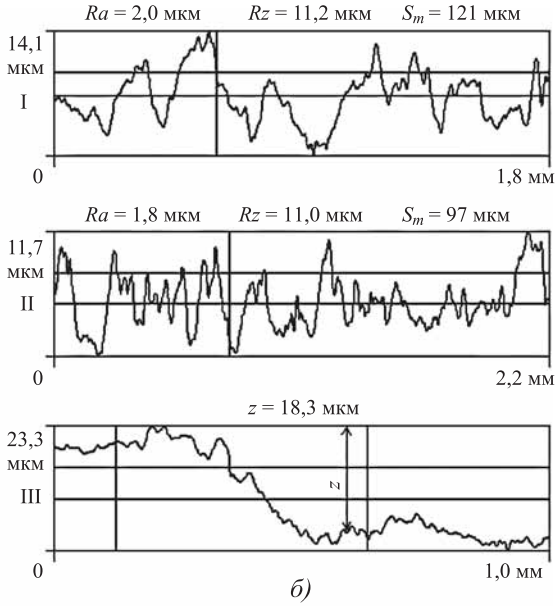


Рис. 4. Профилограммы образцов с различными покрытиями:

а — № 29/1; *б* — № 30/2; *в* — № 228; I — покрытие; II — базовая поверхность без покрытия; III — переход с уровня покрытия на базовую поверхность

2. Результаты исследований

Номер образца покрытия	Профиль покрытия	Профиль базовой поверхности	Ступенька с покрытия на базовую поверхность, толщина покрытия z	Концентрация покрытия, %
	Параметр шероховатости Rz			
	мкм			
29/1	9,6	17,7	63,9	75
30/2	11,2	11,0	18,3	50
228 Condaero	10,7	9,3	12,9	50

При концентрации 50 % часть суспензии в процессе нанесения стекает с поверхности заготовки, создавая покрытие толщиной в среднем 15,6 мкм с параметром шероховатости Rz = 11 мкм (рис. 4, *б, в*).

Профилометр мод. 130 может найти применение в образовательном процессе высшего учебного заведения для проведения лабораторных работ по курсу "Покрытия материалов".

Заключение. Полученные достоверные результаты по значениям параметра шероховатости и толщине покрытий с помощью профилометра мод. 130 дают основание для его использования в исследовательских работах по теплозащитным покрытиям заготовок-лопаток из труднодеформируемых сплавов с их последующим деформированием.

Разработанный специальный щуп для профилометра мод. 130 позволяет выполнять измерения хрупких защитных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петров А.Н.** Развитие заготовительного производства // Авиационная промышленность. 2002. № 3. С. 40 — 50.

2. **Петров А.Н.** Исследование коллоидно-графитовых теплозащитных покрытий для никелевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 5. С. 35 — 38.

3. **Петров А.Н.** Коллоидно-графитовые смазочные материалы в процессах горячего деформирования сталей и сплавов. М.: Университет машиностроения, 2012. 212 с.

4. **Основы** трибологии: учеб. для техн. вузов / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

5. **Friction,** lubrication and wear technology. ASM Handbook. Vol. 18. Edited by P.J. Blau. USA: ASM International, 1992. 942 p.

6. **Hu Z.M., Dean T.A.** A study of surface topography, friction and lubricants in metal forming // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2000. Vol. 3. Iss. 11. P. 1637—1649.

Александр Николаевич Петров, д-р техн. наук;
Борис Альбертович Логинов;
Михаил Александрович Петров, канд. техн. наук,
petroffma@gmail.com

УДК 621.745.4

И.О. Леушин, А.Н. Грачёв, К.А. Маслов, Л.И. Леушина, Д.О. Моисеев
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

К вопросу о дегазации свинцовой литейной латуни марки ЛЦ40Сд

Рассмотрена проблема дегазации свинцовой литейной латуни. Для предупреждения образования газовой пористости предложено использование таблетки-дегазера на основе мраморной крошки, обеспечивающее высокий дегазирующий эффект.

Ключевые слова: литейная латунь; дегазация; газовая пористость; таблетка-дегазер на основе мраморной крошки.

Issue of degassing of leaded cast brass is considered. Authors suggest using the tablet for degassing based on marble chips. It provides high degassing effect.

Keywords: cast brass; degassing; gas porosity; tablet for degassing based on marble chips.

Свинцовая литейная латунь марки ЛЦ40Сд (ГОСТ 17711—93) представляет собой технологичный, недорогостоящий, умеренно коррозионно-стойкий материал, который широко применяют для изготовления способом литья под высоким давлением арматуры (втулки, тройники, переходники), сепараторов подшипников, работающих в пресной воде или на воздухе.

Латунь данной марки традиционно плавят в индукционных канальных печах, а также в индукционных тигельных печах на высоких промышленных частотах посредством переплава чушек готового сплава. Ее особенностью является высокая упругость паров цинка над жидким металлом, интенсивно повышающаяся с увеличением температуры расплава и препятствующая проникновению газов из атмосферы цеха непосредственно в расплав. В этой связи опасность насыщения расплава такими газами, как кислород и водород, считается минимальной, поэтому плавку ведут на воздухе, а дегазацию расплава часто не проводят, ограничиваясь только мерами профилактики образования неметаллических включений из-за контакта расплава с футеровкой печи.

Тем не менее производственный опыт, например, ОАО "Горьковский автомобильный завод" свидетельствует о том, что основной причиной газовой пористости отливок из свинцовой латуни, получаемых на машинах литья под давлением с горизонтальной холодной камерой прессования, является газонасыщенность расплава, заливаемого в камеру прессования машины, а не характерные для данного способа литья недостатки вентиляции формы или несовершенства литниковой системы.

Для предупреждения образования газовой пористости на отливках из латуни ЛЦ40Сд в ОАО "Горьковский автомобильный завод" проводили комплексные испытания продукции фирмы FOSECO: покровно-рафинирующего флюса "ELEKTRO 1743/2" и брикета для дегазации "LOGAS 50", которые подтвердили тезис о том, что для обеспечения гарантированного качества литья рафинированию и, в частности, дегазации расплава латуни данной марки необходимо уделять серьезное внимание.

Однако руководством предприятия применение указанных материалов было признано

нерациональным из-за их высокой стоимости, а также необходимости импортозамещения, и была поставлена задача разработать альтернативный способ дегазации, не требующий специального оборудования и предполагающий использование дешевых материалов при минимальных затратах на подготовку.

Группой исследователей, представляющих Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, было предложено использовать таблетку-дегазер на основе мраморной крошки без каких-либо изменений технологии плавки латуни, реализуемой на базовом предприятии.

Основная идея заключалась в использовании реакции разложения карбоната кальция при температурах выше 900 °С (рабочая температура расплава в плавильном агрегате составляет 950...970 °С):

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2.$$

При протекании реакции в условиях контакта таблетки с металлическим расплавом выделяется летучий диоксид углерода, который выходит на поверхность ванны расплава, увлекая за собой газы, находящиеся в расплаве, создавая тем самым эффект дегазирующей продувки.

Таблетки изготовляли из мраморной крошки с размером фракции не более 0,1 мм с небольшими добавками 5%-ного водного раствора поливинилового спирта для обеспечения формуемости материала холодным прессованием на прессе, после чего просушивали в термической печи при температуре 100 °С в течение 60 мин для удаления воды. В итоге масса одной таблетки составляла 80 г при высоте 50 мм и диаметре основания 30 мм.

Была изготовлена экспериментальная партия таблеток для производственных испытаний. Плавку вели в индукционной канальной печи. Необходимое для обработки расплава число таблеток определяли расчетным путем. Таблетки погружали в печь с помощью колокольчика при температуре 950 °С. Время дегазации составляло 4 мин. Были отлиты контрольные образцы, которые исследовали металлографическим методом для выявления газовой пористости. В результате в металле образцов газовая пористость не обнаружена, что позволило сделать вывод об эффективности применения предложенного альтернативного варианта дегазации расплава.

Последующее промышленное опробование в условиях действующего производства показало снижение брака по газовым дефектам на отливках из свинцовой латуни марки ЛЦ40Сд, полученных на машинах литья под давлением марки TST-250 с холодной горизонтальной камерой прессования, с 10 до 0,1 %.

Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук,
igoleu@yandex.ru;
Александр Николаевич Грачёв, канд. техн. наук;
Константин Александрович Маслов, канд. техн. наук;
Любовь Игоревна Леушина;
Дмитрий Олегович Моисеев

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 08.02.2016. Подписано в печать 30.03.2016. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.