ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Том 16 № 4 апрель 2018

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

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

Зам. главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

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

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

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Акутин А.А., Кабанов Н.П. Влияние добавки NaCl на свойства гипсовых смесей и форм для отливок из алюминиевых сплавов 147
Абрамова Н.Б. Технология изготовления заготовок для медных стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок 152
Овчинников В.В., Губин А.М., Курбатова И.А. Сварка трением с перемешиванием дисперсно-армированных керамическими частицами композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов 155

Кузнечно-штамповочное производство

Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р. Построение математической модели процесса гибки листовых заготовок с использованием бабы листоштамповочного молота с наполнителем 162
Складчиков Е.Н., Артюховская Т.Ю., Трух С.С. Автоматическая компенсация износа фрикционных элементов муфт включения кривошипных прессов 168

Прокатно-волочильное производство

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Губанов С.А., Новоселов А.Э. Математическое моделирование и сравнительный анализ деформированного состояния металла при асимметричной прокатке и равноканальном угловом прессовании 175

Материаловедение и новые материалы

Титова Ю.В., Майдан Д.А., Сафаева Д.Р. Развитие азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза нанопорошка SiC 182

Информация

Филиппов Ю.К., Петухов И.С., Пономарев А.Н., Козлечков А.В., Умаров С.М. Художественная рельефная чеканка подарочных юбилейных медалей 188

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

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2018

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Press forging, foundry and other productions)

Vol. 16 № 4 April 2018

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

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

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

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

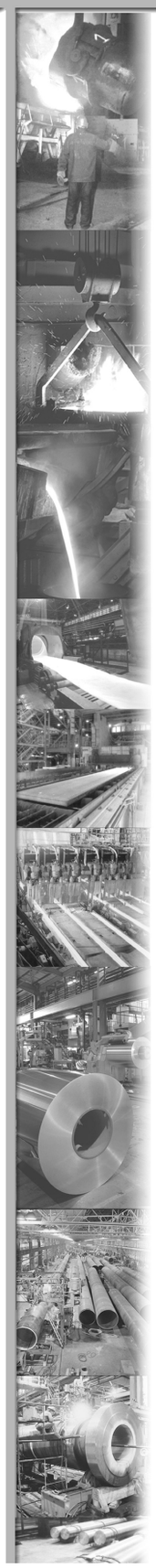
This issue prepared with assistance of specialists:
SERIKOVA E.A.
ORLOVA A.V.

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

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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



CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Akutin A.A., Kabanov N.P. Effect of NaCl addition on properties of gypsum sands and moulds for aluminum castings 147
Abramova N.B. Technology for manufacturing of blanks for copper working walls of moulds of continuous casting machines 152
Ovchinnikov V.V., Gubin A.M., Kurbatova I.A. Friction stir welding of dispersed reinforced by ceramic particles of aluminum-based composite materials 155

Forging and Stamping Production

Lavrinenko V.Yu., Shagaleev R.R. Developing of mathematic model of bending of sheet blanks by hammer ram with fillets 162
Skladchikov E.N., Artyukhovskaya T.Yu., Trukh S.S. Automatic compensation for wear of engage clutches friction elements of crank presses 168

Rolling and Drawing Production

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Gubanov S.A., Novoselov A.E. Mathematical modeling and comparative analysis of deformed state of metal during asymmetric rolling and equal channel angular pressing 175

Physical Metallurgy and New Materials

Titova Yu.V., Maydan D.A., Safaeva D.R. Development of azide technology of self-propagating high-temperature synthesis of SiC nanopowder 182

Information

Filippov Yu.K., Petukhov I.S., Ponomarev A.N., Kozlechkov A.V., Umarov S.M. Art relief coining of gift commemorative medals 188

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

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

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

УДК 621.742.4

А.А. Акутин, Н.П. Кабанов
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)

Влияние добавки NaCl на свойства гипсовых смесей и форм для отливок из алюминиевых сплавов

Приведены результаты экспериментов по оценке влияния хлорида натрия на свойства гипсовых смесей и форм для алюминиевого литья. Даны рекомендации, необходимые для разработки технологии изготовления гипсовых форм и стержней из смесей с добавкой соли.

Ключевые слова: хлорид натрия; гипс; отливки из алюминиевых сплавов; прочность на изгиб; жидкотекучесть; объемная усадка; коробление; сроки схватывания; опытное производство.

The results of experiments evaluating the effect of sodium chloride on the properties of gypsum sands and moulds for aluminum castings are presented. Recommendations necessary for the development of manufacturing technology of gypsum moulds and cores from sands with the addition of salt are given.

Keywords: sodium chloride; gypsum; castings from aluminum alloys; bending strength; fluidity; volumetric shrinkage; buckling; setting time; pilot production.

Применение литейных форм и стержней, изготовленных на гипсовой связке, для литья ответственных отливок из алюминиевых сплавов со сложными внутренними полостями приводит к сложностям при удалении гипсовых смесей из этих полостей. Разработанный на кафедре "Материаловедение, литье, сварка" РГАТУ им. П.А. Соловьева состав гипсовых смесей с добавкой соли NaCl для улучшения выбивки гипсовых форм и стержней показал хорошие результаты при промышленном опробовании [1].

Для отработки технологии получения отливок с использованием гипсовых смесей с добавкой соли были проведены исследования влияния соли на свойства смесей и форм.

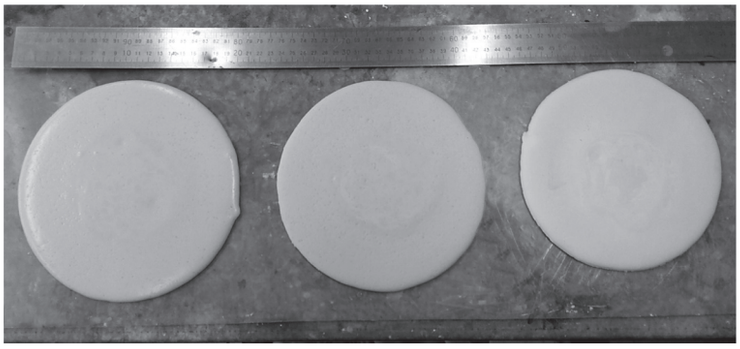
В процессе испытаний определяли влияние соли на жидкотекучесть, сроки схватывания и прочность готовых и самостоятельно приготовленных гипсовых смесей.

Консистенцию (жидкотекучесть) гипсового теста определяли по стандартной методике с помощью вискозиметра Суттарда. Нормальной густотой гипсового теста считают такую его консистенцию, при которой тесто, вытекая из цилиндра вискозиметра, расплывается в лепешку до диаметра 175...185 мм.

Крупнокристаллическую соль NaCl вводили в гипсовую массу (сухую смесь, замешанную с водой) в прокаленном (500 °С, 2 ч) и непрокаленном виде. Испытания на разработанном составе смеси (сухая смесь: гипс (40 %) + волластонит (60 %), а также вода (47 %) с добавкой 12 % соли) показали, что соль увеличивает жидкотекучесть массы, причем непрокаленная больше, чем прокаленная (рис. 1).

Установлено, что для получения нормальной густоты гипсовой смеси требуется на 7 и 4 % меньше воды при добавлении непрокаленной и прокаленной соли соответственно.

zp418.indd 147 05.04.2018 12:25:12



а) *б)* *в)*

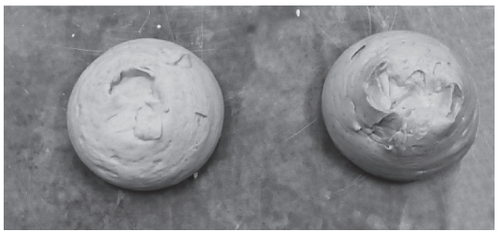
Рис. 1. Образцы на жидкотекучесть различных диаметров:
а — 196 мм, с непрокаленной солью; *б* — 190 мм, с прокаленной солью; *в* — 182 мм без соли

а) *б)* *в)*

Рис. 2. Образцы на жидкотекучесть с непрокаленной солью (*а*), с прокаленной солью (*б*) и без соли (*в*)

Через 20...24 ч после проведения опыта на жидкотекучесть на образцах, полученных с добавкой соли, в отличие от образца без добавки соли, с обратной стороны образовались трещины в результате объемной усадки (рис. 2).

Также были проведены исследования при добавке соли в составы готовых гипсовых смесей, например, KERR "Satin Cast" и Gold Star KB (табл. 1 и рис. 3), которые показали резкое снижение жидкотекучести при 12 % соли, как прокаленной, так и непрокаленной. Увеличение количества воды (даже в значительных количествах) не исправило ситуации. Нормальная густота для данных смесей получена при введении не более 1 % соли (рис. 4).



а) *б)*

Рис. 3. Образцы № 2 (*а*) и № 3 (*б*)

В составе готовых гипсовых смесей присутствуют добавки, замедляющие сроки схватывания гипса, уменьшающие прилипаемость к оснастке, поэтому можно предположить, что добавление соли в больших количествах при взаимодействии с этими добавками вызывает резкое снижение жидкотекучести гипсового теста. Следовательно, для сохранения жидкотекучести в эти смеси следует

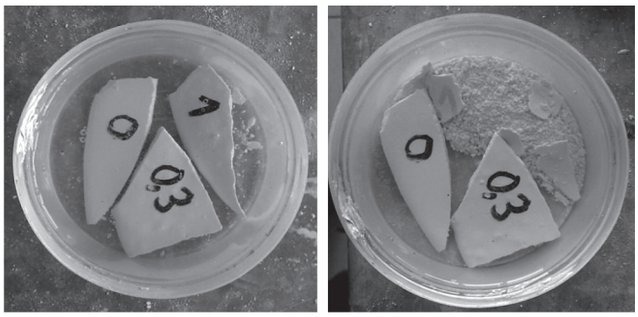
а) *б)* *в)*

Рис. 4. Образцы диаметрами 175 мм (*а*, *б*) и 152 мм (*в*):
а — без соли; *б* — 0,3 % соли; *в* — 1 % соли

1. Результаты испытания на жидкотекучесть с использованием смеси Gold Star KB

Параметр	Номер образца						
	1	2	3	4	5	6	7
Сухая смесь, г	180						
Вода, г (%)	72 (40)			81 (45)		90 (50)	99 (55)
Соль, г (%)	Без соли	21,6 (12)					
		прокаленная соль	непрокаленная соль	прокаленная соль	непрокаленная соль	прокаленная соль	непрокаленная соль
Диаметр образца, мм	169	83	82,5	115	121	138	156

zp418.indd 148 05.04.2018 12:25:12



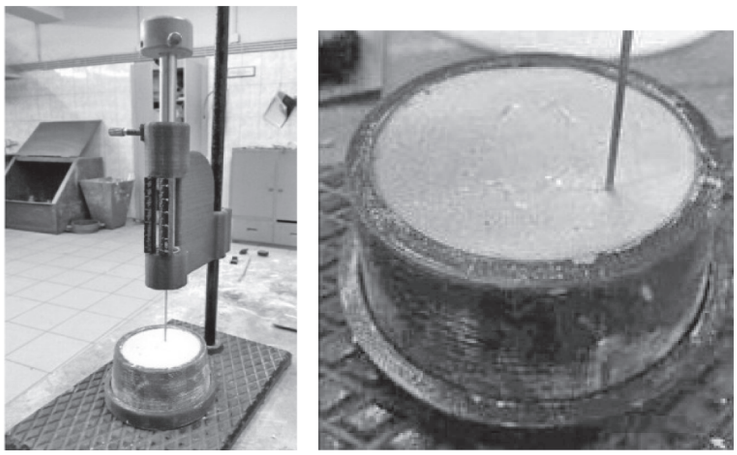
а) *б)*

Рис. 5. Образцы с добавкой 0, 0,3 и 1 % соли в воде до (*а*) и после (*б*) незначительного возмущения воды

добавлять не более 1 % соли. Например, такого количества соли (0,7...1 %) при введении в состав гипсовой массы на основе Gold Star KB достаточно для значительного улучшения выбивки гипсовых форм (рис. 5).

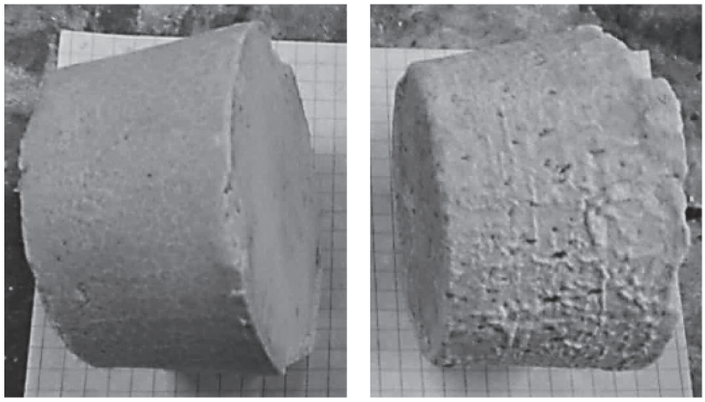
Влияние соли на схватываемость гипсовых масс исследовали на приборе Вика (рис. 6). Известно, что добавка растворенного в воде NaCl в количестве меньше 20 % ускоряет процесс затвердевания гипса, а больше 20 % — замедляет [2]. Так как по предлагаемой технологии крупнокристаллическую нерастворенную соль вводят в гипсовую массу непосредственно перед заполнением оснастки, необходимо определить ее влияние на сроки схватывания гипсовой массы.

В ходе экспериментов на разработанном составе гипсовой смеси (таком же, как при исследовании на жидкотекучесть) с добавками прокаленной и непрокаленной соли от 7 до 12 % установлено незначительное ускорение процесса затвердевания по сравнению со смесью без добавки соли. При этом наблюдалось значительное замедление процесса нарастания прочности гипсовых образцов с добавкой соли, особенно непрокаленной. В течение недели на образцах для испытания на схватываемость с обоими видами соли появились высолы (на образце с добавкой непрокаленной соли в большей степени) и значительная объемная усадка (рис. 7).



а) *б)*

Рис. 6. Прибор Вика (*а*) и процесс определения начала и конца схватывания гипсовой массы с помощью периодического погружения иглы прибора, находящейся под постоянной нагрузкой (*б*)



а) *б)*

Рис. 7. Высолы на образцах:
а — с прокаленной солью; *б* — с непрокаленной солью

Прочность образцов размерами 90×15×10 мм из разработанного состава гипсовой смеси с добавкой прокаленной и непрокаленной соли (7, 10, 12 %) и без соли определяли при испытании на изгиб по двум вариантам:

1) при температуре 20 °С, через 1 ч после схватывания, без термической обработки;

2) при температуре 200 °С, после прокалки образцов со скоростью нагрева 250 °С/ч до температуры 600 °С с выдержкой 1,5 ч.

Установлено, что:

1. Добавка соли снижает предел прочности на изгиб непрокаленных образцов примерно в 5 раз (табл. 2). Для исследуемого состава он приблизительно соответствует пределу прочности образцов из готовых гипсовых смесей (например, Gold Star KB).

zp418.indd 149 05.04.2018 12:25:13

2. Результаты испытания на изгиб непрокаленных образцов

Содержание соли, %		$R_{изг\ 1}$	$R_{изг\ 2}$	$R_{изг\ 3}$	$R_{изг\ 4}$	$R_{изг\ ср}$
		кПа				
Без соли		1133	996	1148	799	1020
7	прокаленная соль	236	169	188	—	200
	непрокаленная соль	221	172	198	195	200
10	прокаленная соль	166	197	189	220	190
	непрокаленная соль	204	198	162	246	180
12	прокаленная соль	262	208	162	159	200
	непрокаленная соль	260	200	185	134	200

Обозначения: $R_{изг\ 1}$ — $R_{изг\ 4}$ — предел прочности на изгиб четырех образцов; $R_{изг\ ср}$ — среднее значение предела прочности на изгиб.

2. Добавка соли повышает предел прочности прокаленных образцов примерно в 6 раз по сравнению с пределом прочности непрокаленных образцов и примерно в 2,5 раза по сравнению с пределом прочности образцов после прокаливания без добавки соли (табл. 3). Это можно объяснить появлением расплава соли в присутствии соли кальция уже при 600 °С, и при затвердевании он упрочняет образцы.

Добавка соли, как показали предыдущие исследования (см. рис. 2 и 7), вызывает объемную усадку при твердении гипса, которая приводит к его короблению, что связано с особенностями кристаллизации гипса в присутствии NaCl, который сдерживает рост кристаллов дигидрата сульфата кальция [2]. Поэтому было принято решение исследовать эти процессы на образцах, применяемых при испытании на изгиб (с тем же составом смеси при добавке 10 % соли), по следующим вариантам:

- образец № 1: извлечение из оснастки через 1 ч после заливки;
- образец № 2: извлечение из оснастки через 1,5 ч после заливки;
- образец № 3: извлечение из оснастки через 1 ч после заливки, далее нагрев в печи до 600 °С в течение 1 ч, затем выдержка 30 мин и охлаждение в печи.

3. Результаты испытания на изгиб прокаленных образцов

Содержание соли, %	$R_{изг1}$	$R_{изг2}$	$R_{изг3}$	$R_{изг4}$	$R_{изгср}$
	кПа				
Без соли	443	425	462	531	470
10 (прокаленная соль)	1335	1025	1192	—	1180

Через определенные промежутки времени замеряли размеры и массу образцов и оценивали их коробление в продольном направлении.

Для образцов № 1 и № 2 (нетермообработанных) наблюдали активную усадку, высолы, потерю массы и коробление (выгибание образцов в продольном направлении) через 3...4 ч до 12...14 ч после схватывания гипса (причем максимальные — у образца № 1) с окончанием процесса примерно через 40 ч (рис. 8).

Образец № 3, прокаленный после извлечения из оснастки, не имел усадки, высолов, коробления и потери массы.

На основании проведенных исследований по влиянию добавки соли NaCl на свойства

Рис. 8. Гипсовые образцы № 1, № 2, № 3 (сверху вниз) при исследовании на коробление

zp418.indd 150 05.04.2018 12:25:13

гипсовых формовочных смесей и изучения в процессе производственной практики технологии изготовления гипсовых форм в ООО "Литейщик" (г. Рыбинск) были разработаны следующие рекомендации для внедрения ее в производство:

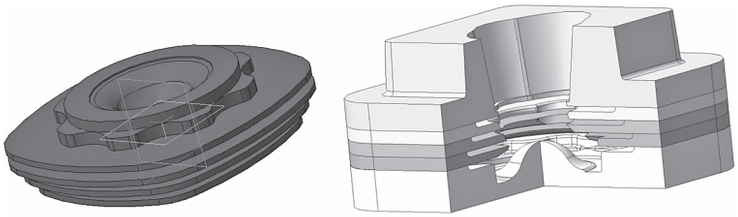
1. Так как серьезной проблемой в данной технологии является удаление остатков гипсовой смеси из труднодоступных полостей отливок, предложено для облегчения выбивки отливок вводить в состав смеси 10...12 % крупной поваренной соли, прокаленной и просеянной через сито с размерами ячеек 1,6 мм. Соль вводят в приготовленную формовочную массу непосредственно перед ее заливкой в оснастку. Замешивание соли в массу осуществляется в течение 10...15 с.

2. Гипсовые стержни и форма, изготовленные с добавкой непрокаленной соли, имеют пониженную прочность, поэтому содержание гипса в смеси должно быть не ниже 50 % для литья отливок из алюминиевых сплавов. После прокаливания прочность форм с добавкой соли возрастает до значений (и выше) предела прочности непрокаленных форм без добавки соли.

3. Так как установлено развитие значительных усадочных напряжений и коробления гипсовых образцов с добавкой соли в течение от 2 до 18 ч после окончания схватывания гипса, необходимо в течение 1...2 ч после извлечения гипсовых стержней или форм из оснастки подвергать их прокаливанию.

4. Скорость нагрева при прокаливании зависит от толщины гипсового стержня или формы с добавкой соли и составляет 400...600 °С/ч для тонких стержней (толщиной 1...2 см) и не более 150...200 °С/ч для толстостенных (толщиной более 5 см).

5. Выбивка форм с добавкой соли осуществляется в результате выдержки в воде (30...60 мин) или под небольшим напором воды (возможно применение ультразвуковой ванны).



а) *б)*

Рис. 9. Отливка "головка цилиндра" (*а*) и гипсовый пакет (литейная форма в сборе с местным разрезом) (*б*)

Разработанные рекомендации применяют в ООО "Литейщик" при изготовлении ответственных опытных отливок из алюминиевых сплавов, например отливки "головка цилиндра" методом литья в гипсовые формы (рис. 9).

Заключение. Исследования влияния добавки NaCl на свойства гипсовых смесей и форм позволили разработать рекомендации и уточнить технологические режимы, необходимые для изготовления гипсовых форм и стержней из смесей с добавкой соли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Акутин А.А., Изотов В.А., Шатульский А.А.** Разупрочняющая добавка в составе смесей на гипсовой связке для упрощения процесса выбивки литейных форм и стержней // Всероссийская конференция в рамках III Междунар. технологического форума "Инновации. Технологии. Производство": сб. материалов. Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2016. С. 48—51.

2. **Ричард ван Нурт.** Основы стоматологического материаловедения. 2-е изд. М.: КМК-Инвест, 2004. 304 с.

Алексей Анатольевич Акутин, канд. техн. наук,
akutinaa@yandex.ru;
Николай Павлович Кабанов

zp418.indd 151 05.04.2018 12:25:13

УДК 669.3

Н.Б. Абрамова
(Кубанский государственный технологический университет)

Технология изготовления заготовок для медных стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок

Рассмотрена технология изготовления заготовок для медных рабочих стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок из бескислородной меди, полученной в печи электронно-лучевого переплава. Исследована стойкость рабочих стенок из различных марок меди.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок; стенки кристаллизатора; технология; заготовки; стойкость.

The technology for manufacturing of blanks for copper working walls of moulds of continuous casting machines from oxygen-free copper obtained in electron-beam remelting furnace is considered. Resistance of working walls from different grades of copper is studied.

Keywords: continuous casting machine; mould walls; technology; blanks; durability.

Непрерывная разливка является наиболее предпочтительной технологией для перевода стали из жидкого состояния в твердое и придания заготовке определенной геометрической конфигурации. Реализация потенциальных возможностей непрерывной разливки как высокоэффективной технологической системы в ближайшие годы потребует дополнительного развития и совершенствования.

В докладах на 8-й Европейской конференции [1], посвященной непрерывной разливке сортовой, блюмовой и круглой заготовки, основное внимание акцентировалось на повышении производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и качестве заготовки. Поскольку отклонение геометрической формы заготовки от заданной конфигурации служит источником возникновения проблем качества, то роль кристаллизатора как агрегата, обеспечивающего заданную геометрическую форму, рассматривается многими исследователями как доминирующая.

Существенное развитие технологии и конструкции сборных кристаллизаторов МНЛЗ получили в работах, выполненных во ВНИИМЕТМАШе под руководством В.Б. Сивака [2], А.А. Целикова, В.М. Паршина [3] и др. Большое значение для решения задач, связанных с механической активацией диффузионных процессов и формированием дефектной структуры, устойчивой к процессам микроскопической деформации, имеют работы С.А. Атрошенко, Р.И. Гарбера, Н.Г. Колбасникова, М.М. Радкевича, И.М. Неклюдова, Б.Н. Струнина и других ученых.

Непрерывнолитая заготовка формируется в кристаллизаторе, который является одним из ответственных узлов МНЛЗ. Кристаллизатор служит аппаратом для отвода теплоты при кристаллизации затвердевающего металла.

От качества рабочих стенок кристаллизатора зависит качество продукции и производительность МНЛЗ. Рабочие стенки кристаллизаторов МНЛЗ работают в условиях циклических интенсивных тепловых потоков (плотность тепловых потоков достигает 20 МВт/м^2), интенсивного износа, циклических термодинамических напряжений, разных типов коррозии, в диапазоне температур 293...863 К. Срок службы рабочих стенок кристаллизаторов значительно меньше срока службы других сменных деталей. Отказы приводят к простоям, авариям на производстве, влияют на экологическую безопасность и безопасность труда.

Для изготовления стенок кристаллизаторов используют различные марки меди, прежде всего благодаря ее высокой теплопроводности. Существует ряд альтернативных вариантов изготовления стенок кристаллизаторов с применением различных марок меди и способов ее получения и обработки [4]. Машиностроительный концерн "ОРМЕТО-ЮУМЗ" (г. Орск) изготовляет стенки для кристаллизаторов МНЛЗ из горячекатаного проката, используя марки меди М1, М1р, М2р, МС (серебросодержащая медь), хромоцирконистую бронзу БрХЦР (рис. 1).

При изготовлении стенок кристаллизаторов механической обработкой из горячекатаной меди М1, М2 и М3 их стойкость получалась низкой, экономического эффекта не было, твердость рабочего слоя не превышала 70 НВ.

zp418.indd 152 05.04.2018 12:25:13

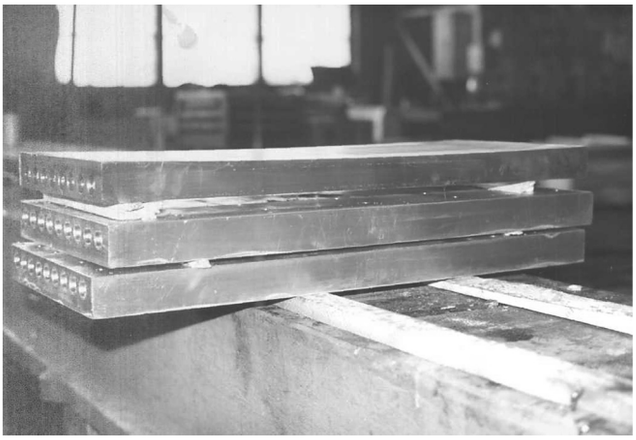


Рис. 1. Стенки кристаллизатора

На "ОРМЕТО-ЮУМЗ" разработан технологический процесс электронно-лучевого переплава, включающий следующие основные операции: электронно-лучевой переплав, резку слитка, обработку пластическим деформированием (рис. 2).

Для определения основных параметров технологии ковки заготовок для медных стенок сборного кристаллизатора был проведен промышленный эксперимент.

Критериями оптимизации при определении структуры и параметров технологии являлись цена и физико-механические свойства, в частности, предел прочности на растяжение и твердость, зависящие от исходного материала, структуры и параметров технологии. Необходимо было разработать такую технологию, которая попадет в область конкурентной и обеспечит физико-механические свойства бескислородной меди, не уступающие свойствам лучших известных ее аналогов.

Согласно исследованиям свойств поковок из бескислородной меди (99,98 % Cu), полученной в печи электронно-лучевого переплава М-ЭЛП, для обеспечения твердости ⩾60 НВ в поверхностных слоях поковки на глубине 20...30 мм твердость поверхности поковки должна быть ⩾90 НВ. Для этого необходима деформация $\varepsilon \geqslant 15...25$ %. Так как толщина поковки должна быть $H_п \geqslant (95 \pm 10)$ мм, то толщина заготовки $H_з \geqslant H_п/(1 - \varepsilon) \approx 120$ мм.

В соответствии с этим разработана схема резки слитка толщиной 280 мм на две равные части с толщиной заготовки $H_з = 130$ мм (рис. 3).

В целях определения исходных данных для разработки технологии и оснастки для ковки измеряли твердость поверхностных слоев заготовки. Измерение проводили с обеих сторон заготовки в пяти точках на каждой стороне прибором "Польди" согласно принятой методике замера. В результате измерений получена твердость 62,9 < НВ < 64, что соответствует пределу прочности $\sigma_в = 160$ МПа.

Согласно требованиям чертежа твердость поверхностных рабочих слоев стенки ⩾60 НВ, $\sigma_в \geqslant 220$ МПа, т.е. стенку можно изготовлять из литой заготовки без пластической деформации. Температура ковки заготовки 293 К.

Заготовка поступала после резки слитка из меди М-ЭЛП и механической обработки с притупленными кромками 10×45° и размерами, указанными на рис. 4.

Для преодоления силы сопротивления деформированию при ковке использовали плоский боек специальной конструкции [5]. Кузнечную вытяжку медной заготовки осуществляли бойком с плоской формой рабочей

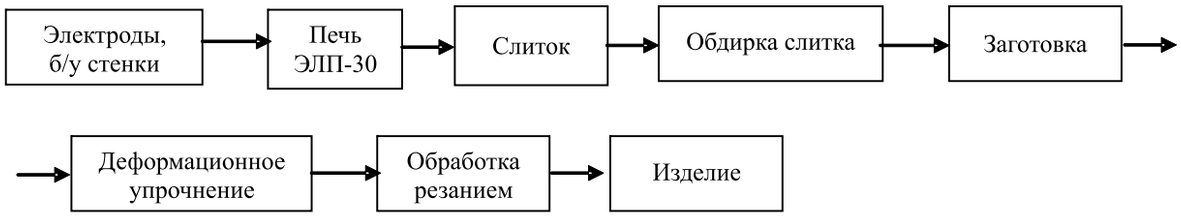


Рис. 2. Последовательность операций при изготовлении заготовок для стенок кристаллизаторов

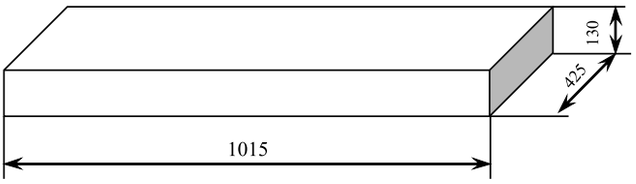


Рис. 3. Эскиз заготовки под ковку

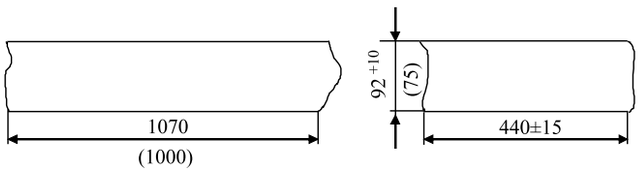


Рис. 4. Эскиз поковки для стенки (размеры в скобках — габаритные чистовые размеры детали)

zp418.indd 153 05.04.2018 12:25:13

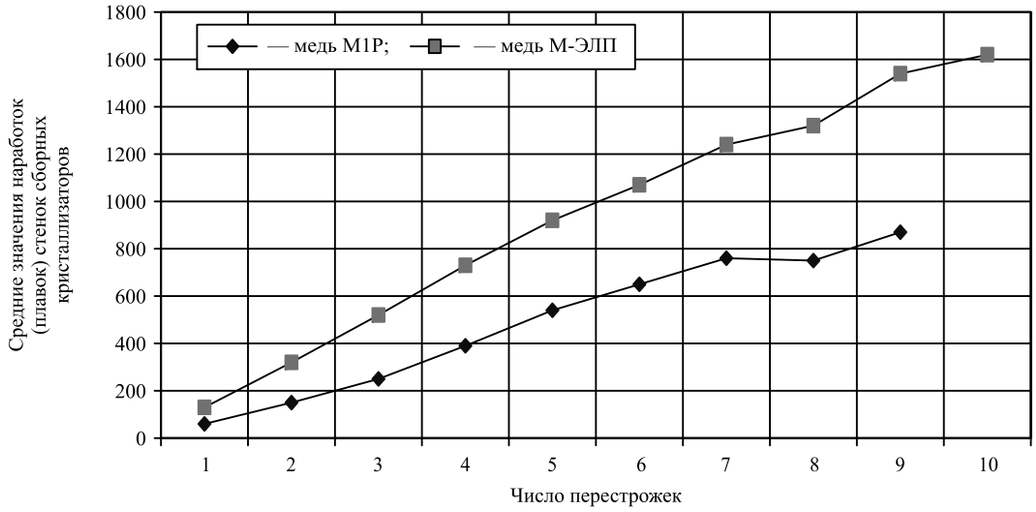


Рис. 5. Общее число средних наработок стенок сборных кристаллизаторов с начала и до конца эксплуатации (в течение 5 лет)

поверхности шириной 80...120 мм с радиусами углов 20...40 мм. Кузнечный боек по конструкции монолитный, изготовлен из стали 50.

Заготовку устанавливали на столе парогидравлического пресса и за *n* проходов осуществляли кузнечную вытяжку при температуре 20 °С. Испытания показали, что при применении данного кузнечного бойка заготовка дефектов (трещин) не имела.

Результаты ковки подтвердили возможность получения из медных ЭЛП-слитков качественных поковок твердостью более 90 НВ при $\varepsilon > 20...25$ %. Данная технология изготовления заготовок для стенок кристаллизатора запатентована [6].

На МНЛЗ Днепродзержинского металлургического комбината (ДМК) эксплуатировались стенки кристаллизаторов, изготовленные из меди М-ЭЛП и меди других заводов, в частности М1р. На ДМК непрерывно проводили сбор информации по техническому состоянию кристаллизаторов. Предварительный анализ информации показал, что надежность стенок из меди М-ЭЛП выше, чем из меди М1р.

Промышленные исследования стенок кристаллизаторов, установленных на ДМК, на основании информации о техническом состоянии стенок из разных марок меди показаны на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что стенки, изготовленные из меди М1р, выдерживают 850 плавок, а из меди М-ЭЛП — 1650 плавок.

На МНЛЗ ОАО "НОСТА" (г. Новотроицк) также эксплуатировались стенки кристаллизаторов, изготовленные по технологии с применением деформационного упрочнения ковкой. Установлено, что стенки кристаллизаторов имеют стойкость в 3 раза выше чем стенки из других марок меди.

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенной технологии. Многолетние промышленные исследования стойкости рабочих стенок для кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок показали, что стойкость рабочих стенок из бескислородной меди с применением деформационного упрочнения ковкой со степенью деформации 20...25 % имеют стойкость в 3 раза выше по сравнению со стенками, изготовленными по традиционной технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Материалы** 8-й Европейской конференции по непрерывной разливке (8th European Continuous Casting Conference) под патронажем Австрийского общества по металлургии и материалам. 23—26 июня 2014 г. Граце (Австрия).

2. **Сивак Б.А.** Пути повышения эффективности работы кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок // Черная металлургия. 1996. Вып. 4. С. 28—36.

3. **Паршин В.М.** О роли непрерывной разливки стали в модернизации отечественной металлургии // Сталь. 1997. № 1. 1997. С. 3—14.

4. **Абрамова Н.Б., Аптекарева О.Н.** Маркетинговые исследования рынка кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. № 5—2. С. 210—215.

5. **Пат. на полезную модель № 70172.** Кузнечный боек для обработки медных заготовок / Н.Б. Абрамова, О.Н. Аптекарева, Л.П. Соломин. Заявка № 2006142453. 2006. Б.И. № 2 от 20.01.2008.

6. **Пат. на изобретение № 2253540.** Способ изготовления изделий из бескислородной меди для кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок / Н.Б. Абрамова, Л.П. Соломин, О.Н. Аптекарева. Заявка № 2003104784. 2005.

Наталья Борисовна Абрамова, канд. техн. наук,
anb_mal@mail.ru

zp418.indd 154 05.04.2018 12:25:14

УДК 621.791.14.01

В.В. Овчинников, А.М. Губин, И.А. Курбатова
(Московский политехнический университет)

Сварка трением с перемешиванием дисперсно-армированных керамическими частицами композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов

Изучены структурные особенности и механические свойства сварных соединений дисперсно-армированных керамическими частицами алюминиевых сплавов. Показано, что применение сварки трением с перемешиванием не приводит к существенным фазово-структурным изменениям в металле шва и на прилегающих к нему участках, что обеспечивает высокий уровень механических свойств соединений.

Ключевые слова: композиционные материалы; наночастицы; керамические частицы; алюминиевая матрица; сварка трением с перемешиванием; механические свойства; макроструктура.

Structural characteristics and mechanical properties of welded joints of ceramic particles reinforced particulate aluminum alloys are studied. It is shown that application of friction stir welding does not lead to significant phase in the weld metal and surrounding areas, which ensures high level of mechanical properties of joints.

Keywords: composite materials; nanoparticles; ceramic particles; aluminum matrix; friction stir welding; mechanical properties; macrostructure.

Введение. Разработка и применение *композиционных материалов* (КМ) состоящих из матрицы и распределенных в ней армирующих элементов и благодаря этому обладающими качественно новыми, зачастую уникальными свойствами, являются одними из важных направлений развития современного материаловедения и машиностроения.

В большинстве случаев только КМ в отличие от традиционных материалов могут удовлетворить требованиям новой техники, для которой характерно ужесточение условий эксплуатации: повышение нагрузок, скоростей, температур, агрессивности сред, уменьшение массы и т.д.

По типу матричного материала КМ делятся на полимерные, металлические, керамические, углерод-углеродные и гибридные, а по геометрии армирующего элемента — на порошковые (дисперсно-армированные), волокнистые и слоистые.

Металлические КМ имеют ряд важных преимуществ: высокие жесткость, прочность, трещиностойкость, износостойкость, электро- и теплопроводность, технологичность, широкий температурный интервал работы (от очень низких до высоких температур). Дисперсно-армированные КМ выгодно отличаются от волокнистых и слоистых изотропией своих свойств, универсальностью и сравнительной простотой технологии изготовления, в связи с чем дисперсно-армированные металлические КМ широко применяют в машиностроении. Среди них на первом месте по объему применения находятся алюмоматричные КМ.

Искусственное введение в структуру пластичных сплавов алюминия тугоплавких, высокопрочных и высокомодульных частиц, например, карбидов (SiC, TiC, B_4C), оксидов (Al_2O_3), боридов (TiB_2) обеспечивает высокие механические свойства, в том числе при повышенных температурах (до 5000 °С), при сохранении малой плотности и других свойств алюминия.

Дисперсно-армированные алюмоматричные КМ изготовляют твердофазными методами порошковой металлургии и жидкофазными методами литья. Хорошо известные алюмоматричные КМ типа САП, в которых функцию упрочняющей фазы выполняют частицы оксида алюминия Al_2O_3, получают твердофазным спеканием алюминиевых порошков, покрытых оксидной пленкой.

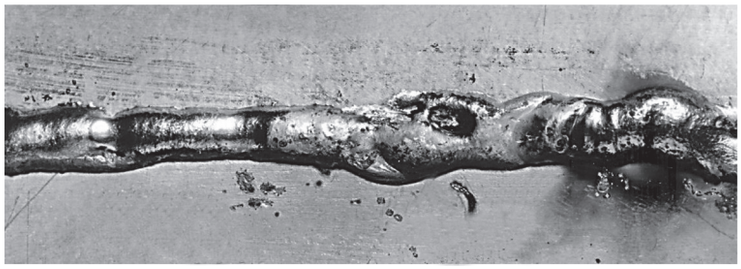
Для изготовления алюмоматричных КМ с армированием частицами карбидов SiC, TiC,

zp418.indd 155 05.04.2018 12:25:14

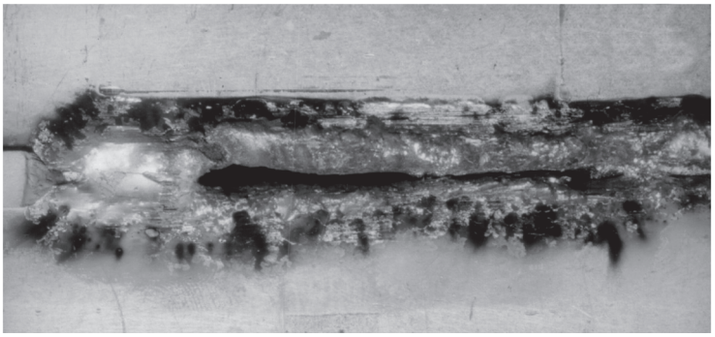
B_4C лучшими признаны жидкофазные методы литья, которые приводят к образованию сильной межфазной связи, необходимой для высоких механических свойств КМ, и позволяют использовать стандартное литейное оборудование. В этом случае КМ можно называть композиционными сплавами.

Жидкофазное соединение компонентов композиционных сплавов осуществляется введением готовых армирующих частиц в матричный расплав, например, механическим замешиванием, и вследствие химической реакции синтеза упрочняющих частиц непосредственно в расплаве.

В последнем случае обеспечиваются более плотный контакт и хорошая связь (адгезия) между фазами композиционного сплава, так как эти фазы не вносятся извне с поверхностями, обычно загрязненными оксидами и адсорбированными газами и влагой, а образуются непосредственно в объеме расплава, не контактируют с атмосферой и не содержат влаги, имеют чистые поверхности.



а)



б)

Рис. 1. Сварные швы на сплавах САП3 (*а*) и АК12М2МгН (АЛ25) с 18 % SiC (*б*). ×2,5

В последние годы особое внимание уделяется получению литых алюмоматричных композиционных сплавов с наноразмерными частицами армирующей фазы. Уменьшение размеров частиц до наноуровня (не более 0,1 мкм) существенно увеличивает их количество в единице объема матричного расплава, тем самым увеличивая число центров кристаллизации при охлаждении расплава.

Литые алюмоматричные КМ перспективны для широкого практического применения в различных областях машиностроения в качестве конструкционных, антифрикционных и других материалов, позволяющих снизить массу изделий, повысить характеристики их работы, создать принципиально новые конструкции.

Однако при изготовлении эффективных сварных конструкций реализация потенциальных возможностей таких перспективных материалов в значительной степени зависит от качества их соединения. Опыт применения дуговой сварки плавлением в защитном газе неплавящимся электродом не дал положительных результатов по качеству формирования сварных соединений дисперсно-упрочненных алюминиевых КМ и по уровню их механических свойств (рис. 1). При сварке плавлением указанных материалов отмечено интенсивное порообразование в металле шва.

При сварке плавлением КМ под воздействием высокотемпературного источника нагрева, которым является электрическая дуга, в месте образования неразъемного соединения происходит полное расплавление некоторого их объема и в процессе его затвердевания формируется сварной шов. Нерасплавляемые армирующие частицы очень неравномерно распределяются в кристаллизующемся металле шва.

Если при сварке композиционных материалов, армированных частицами карбида кремния, температура нагрева металла превышает 660 °С, то в результате их взаимодействия с алюминием могут образоваться игольчатые включения карбида алюминия Al_4C_3. Это приводит к значительному ухудшению свойств металла шва, а следовательно, и сварных соединений.

Цель работы — оценка эффективности применения *сварки трением с перемешиванием* (СТП) для получения качественных соединений дисперсно-армированных керамическими частицами композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов.

Методика проведения исследований. Исследовали КМ на основе алюминиевых сплавов

zp418.indd 156 05.04.2018 12:25:14

1. Состав, параметры структуры и предел прочности листов толщиной 5 мм из композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов

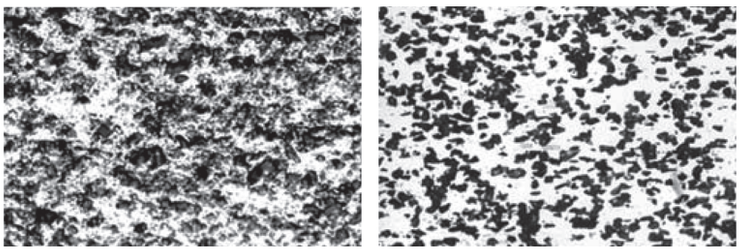
Матричный сплав	Содержание армирующих частиц	Размеры армирующих частиц	Расстояние между армирующими частицами	Предел прочности $\sigma_в$, МПа
		мкм		
АМг5	27 % Al_2O_3	3...15	3...20	342
1565	20 % Al_2O_3	5...20	5...40	384
АК12М2МгН (АЛ25)	25 % Al_2O_3	5...20	5...60	265
	18 % SiC	5...15	3...50	273
Д16	20 % SiC	3...5	1...5	510
		0,05...0,08	0,1...2,7	570
АД0	8 % Al_2O_3	0,04...0,07	0,1...2,3	142
САП3	15 % Al_2O_3	3...15	3...20	400

2. Режимы однопроходной сварки трением с перемешиванием листов дисперсно-армированных алюминиевых сплавов

Сплав	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Угол наклона инструмента в плоскости стыка (против часовой стрелки), °	Сила прижатия буртика инструмента к поверхности деталей, кН
АМг5, 1565ч, Д16, АД0, САП3	710	225	3	2,3...2,7
АК12М2МгН (АЛ25)	900	160	4	3,2...3,8

с дисперсными армирующими керамическими частицами оксида алюминия Al_2O_3или карбида кремния SiC (табл. 1). Благодаря высоким значениям модуля упругости, износостойкости и жаропрочности, а также низкой плотности и коэффициентов термического расширения и трения эти конструкционные материалы являются перспективными [1—4].

Структура дисперсно-армированного КМ на алюминиевой основе состоит из матричных зерен алюминиевого сплава, находящихся в нем интерметаллидных включений и частиц армирующей фазы, распределенных по всему объему матрицы (рис. 2).



а) *б)*

Рис. 2. Микроструктуры композиционных материалов на основе алюминиевого сплава Д16 с 20 % SiC (*а*) и САП3 с 15 % Al_2O_3 (*б*): *а* — ×500; *б* — ×450

Стыковые соединения листов исследуемых сплавов выполняли СТП на экспериментальной установке, созданной на базе модернизированного вертикального фрезерного станка с числовым программным управлением MECOFCS—1040 (Италия) в комплекте со сборочно-сварочной оснасткой.

Режим СТП (частоту вращения инструмента, скорость перемещения инструмента, силу прижима инструмента к свариваемым листам, угол наклона инструмента в плоскости свариваемого стыка) выбирали из условия получения плотного шва без дефектов и несплошностей (табл. 2).

СТП осуществляли инструментом в виде державки со сменным наконечником, состоящим из буртика и стержня, на поверхности которого выполнена винтообразная канавка глубиной 0,8 мм. Стержень диаметром 4,0 мм имел высоту 4,8 мм для гарантированного соединения

zp418.indd 157 05.04.2018 12:25:14

свариваемых листов по всей их толщине. Инструмент изготовлен из инструментальной стали Р18 [5, 6].

Прочность соединений определяли на образцах по ГОСТ 6996—66 с шириной рабочей части 15 мм. Испытания образцов проводили на универсальной электромеханической испытательной машине "Инстрон 5980". Для испытаний на статический изгиб применяли образцы шириной 10 мм, вырезанные поперек шва.

Макроструктуру сварных соединений, а также характер их разрушения исследовали на цифровом стереоскопическом микроскопе MoticDM-39C-N9GO-A. Для выявления макро- и микроструктуры образцы соединений подвергали травлению в реактиве Келлера (5 % HCl; 5 % HNO_3; 5 % HF; 85 % H_2O).

Для исследования микроструктуры соединений использовали сканирующий электронный микроскоп EVO-50 фирмы Carl Zeisse с приставкой для определения содержания легирующих элементов в различных зонах сварного соединения.

Результаты исследований и их обсуждение. На характеристики КМ, кроме механических свойств наполнителя и матричного сплава, объемного соотношения компонентов, структуры композиционных отливок и характера термической или термомеханической обработки значительно влияют фракционный состав и равномерность распределения армирующих частиц в матрице.

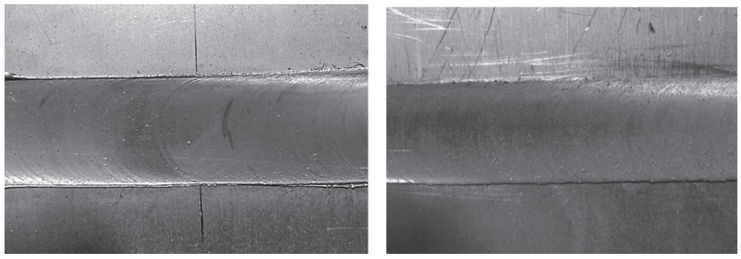
От размера армирующих частиц зависят их внутреннее строение и структура межфазных поверхностей разграничения с матрицей. С уменьшением армирующих частиц снижаются плотность дислокаций и уровень внутренних напряжений в приграничных слоях. В больших частицах наблюдается упругий изгиб решетки на стыках отдельных зерен, что приводит к возникновению на этих участках упругих напряжений.

С увеличением размера частиц у них повышается плотность дефектов структуры, количество двойников и дефектов упаковки [3, 4]. Поэтому композиционные материалы с нанодисперсными армирующими частицами Al_2O_3 или SiC являются одними из наиболее перспективных конструкционных материалов для изготовления эффективных сварных конструкций.

Анализ полученных сварных соединений показал, что выбранные режимы СТП обеспечивают качественное формирование шва (рис. 3).

Макроструктура соединений дисперсно-упрочненных керамическими наночастицами КМ на алюминиевой основе имеет те же структурные зоны, которые традиционно присутствуют в соединениях алюминиевых сплавов, полученных СТП (рис. 4). В этой структуре выделяется зона ядра шва, имеющая мелкодисперсную структуру и примыкающая к основному материалу [7], который подвергся тепловому воздействию и изменил направление своей текстуры вследствие вращательного и поступательного перемещения сварочного инструмента.

При одноосном растяжении образцы сварных соединений этих КМ, полученных СТП, разрушаются в зоне термомеханического воздействия по границе шва с основным металлом (рис. 5), где кроме минимальной твердо-



а) *б)*

Рис. 3. Швы с лицевой стороны, выполненные СТП, на сплавах АК12М2МгН (АЛ25) (*а*) и САП3 (*б*)

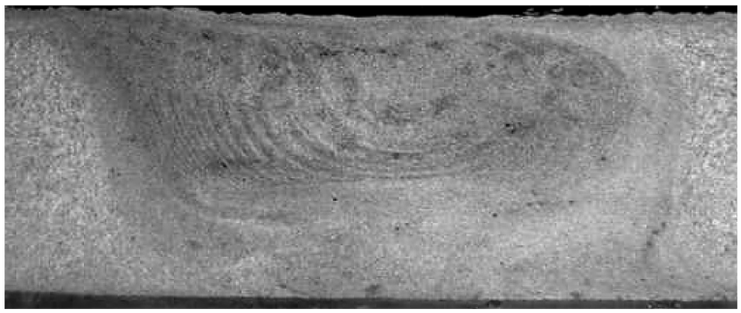


Рис. 4. Макроструктура соединения сплава САП3, полученного СТП. ×6

zp418.indd 158 05.04.2018 12:25:14

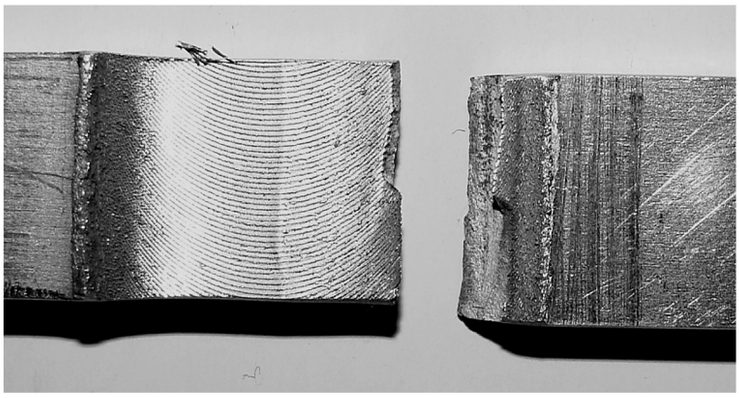
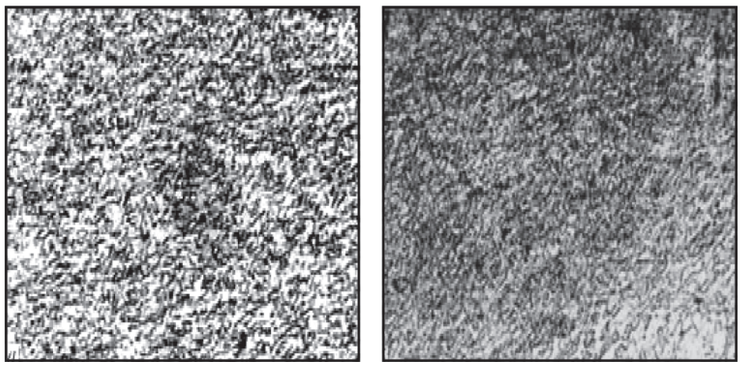


Рис. 5. Типичное разрушение образцов соединений, полученных СТП, дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов. ×4



а) *б)*

Рис. 6. Микроструктуры швов, полученных СТП, композиционных нанодисперсных материалов на основе сплава 1565 с 20 % Al_2O_3 (*а*) и сплава Д16 с 20 % SiC (*б*). ×400

сти металла образуются участки со структурными отличиями.

В процессе сварки КМ на основе алюминия с нанодисперсными армирующими частицами важно обеспечить равномерное распределение этих частиц по всему объему металла шва и не допустить их скопления. Исследования показали, что при СТП в твердой фазе удается сохранить исходную нанодисперсность армирующих частиц и степень их рассредоточения по сечению шва на уровне основного материала (рис. 6).

В табл. 3 приведены значения предела прочности соединения, предела прочности металла шва и коэффициента прочности соединения, выполненного СТП, для исследуемых композиционных материалов.

Особенности структуры швов и их механические свойства исследовали при СТП листов толщиной 5 мм из алюминиевого композиционного материала САП3, упрочненного нанодисперсными частицами Al_2O_3. Наличие в этом сплаве керамических наночастиц размером 100...200 нм обеспечивает при комнатной температуре предел прочности листа $\sigma_в$ = 400 МПа и относительное удлинение δ = 4 %, а при температуре 350 °С — $\sigma_в$ = 180 МПа и δ = 6 %.

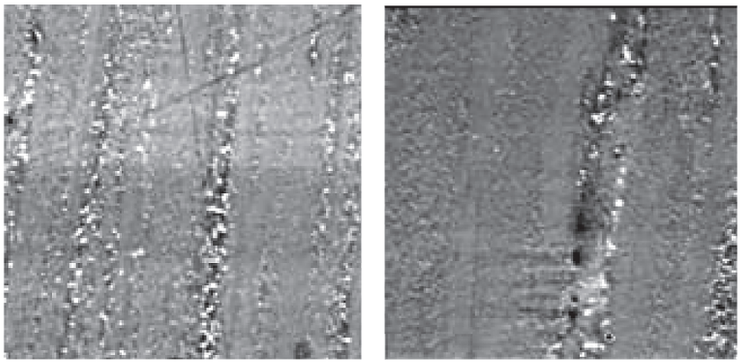
Получить качественные неразъемные соединения такого материала сваркой плавлением практически невозможно. Во-первых, при нагреве до высоких (более $0{,}8T_{пл}$) температур керамические наночастицы приобретают форму кристаллических интерметаллидов, в результате чего материал становится хрупким и теряет свои прочностные и пластические характеристики [8]. В то же время при расплавлении материала упрочняющие частицы выделяются из алюминиевой матрицы и препятствуют образованию общей сварочной ванны и формированию непрерывного плотного шва (см. рис. 1).

Экспериментальные исследования показали, что перспективным способом получения качественных неразъемных соединений таких материалов является СТП, осуществляемая в твердой фазе и не приводящая к изменению

3. Параметры исследуемых композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов

Параметр	АМг5 (27 % Al_2O_3)	1565 (20 % Al_2O_3)	АК12М2МгН (АЛ25)		Д16 (20 % SiC)	АД0 (8 % Al_2O_3)	САП3 (15 % Al_2O_3)
			25 % Al_2O_3	18 % SiC			
Предел прочности, МПа:							
соединения	311	357	230	216	383	138	328
металла шва	323	370	244	228	405	149	355
Коэффициент прочности соединения	0,91	0,93	0,87	0,79	0,75	0,97	0,82

zp418.indd 159 05.04.2018 12:25:14



а) *б)*

Рис. 7. Микроструктуры основного материала в продольном направлении (*а*) и ядра шва (*б*), полученного при СТП алюминиевого сплава САП3 толщиной 5 мм

фазово-структурного состояния исходных полуфабрикатов. В результате металлографических исследований установлено, что в металле шва средний размер зерна α-Al-матрицы составляет приблизительно 220...280 нм, а керамических наночастиц — 90...170 нм, как и в основном материале (рис. 7).

Анализ тонкой структуры показал, что упрочняющие керамические наночастицы имеют округлую форму, размытые границы в изображении светлого поля и характерный елочный контраст в изображении темного поля в основном материале и в швах, полученных СТП (рис. 8). При этом в металле шва сформирована равномерная смесь зерен α-Al-матрицы с керамическими наночастицами.

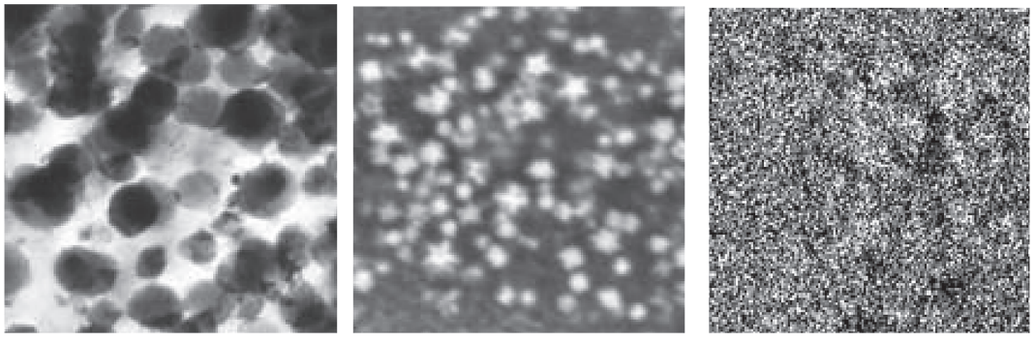
В процессе СТП не происходит нагрев металла до высоких температур, благодаря этому все упрочняющие наночастицы сохраняют свою структуру, о чем свидетельствуют результаты рентгенографического структурного анализа.

При сварке в зоне термомеханического влияния на границе шва с основным материалом происходит переориентация направления волокон, обусловленная силовым воздействием вращающегося и движущегося вдоль стыка сварочного инструмента.

Механические испытания при одноосном растяжении образцов, полученных СТП, показали, что их разрушение при температурах 20 и 300 °С происходит по зоне перехода шва к основному материалу с частичным распространением в металл шва и в зону термомеханического влияния (рис. 9). При большом увеличении на поверхностях изломов хорошо заметны углубления, свидетельствующие о вязком характере разрушения образцов.

Предел прочности соединений при температуре испытаний 20 °С составляет 355 МПа, а при 350 °С — 121 МПа. Коэффициент прочности сварных СТП-соединений равен 0,82 при температуре испытаний 20 °С и 0,67 — при 350 °С. При этом относительное удлинение образцов сохраняется на уровне 3,5 и 5,2 % соответственно для приведенных выше температур их испытания.

Заключение. Благодаря формированию швов в твердой фазе процесс СТП позволяет получать качественные неразъемные соединения композиционных алюминиевых сплавов, упрочненных керамическими наночастицами, без изменения их фазово-структурного состояния. При сварке композиционных материалов диссоциации армирующих частиц не про-



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Керамические наночастицы на ТЭМ-снимке светлого поля (*а*), на СЭМ-снимке в обратно рассеянных электронах (*б*) и в характеристическом рентгеновском излучении (*в*)

zp418.indd 160 05.04.2018 12:25:15

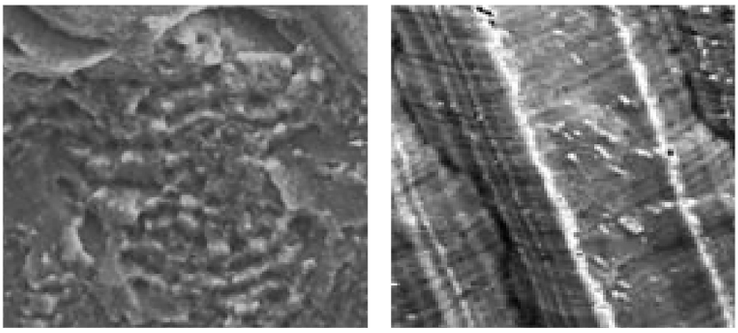


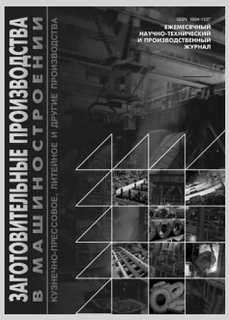
Рис. 9. Микроструктуры отдельных участков излома поверхности разрушенного образца. ×1400

исходит, а их дисперсность и равномерность распределения в металле шва сохраняются на уровне основного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сварка** давлением микродисперсного композиционного материала АМг5 + Al_2O_3 с применением быстро закристаллизованной прослойки эвтектического состава Al + 33 % Cu / Ю.В. Фальченко, А.Н. Муравейник, Г.К. Харченко и др. // Автоматическая сварка. 2010. № 2. С. 10—14.
2. **Исследование** свариваемости дисперсно-упрочненного композиционного материала Al + SiC / В.Р. Рябов, А.Н. Муравейник, В.П. Будник и др. // Автоматическая сварка. 2001. № 15. С. 15—19.
3. **Исследование** структуры композиционного материала на алюминиевой основе, упрочненного частицами карбида кремния / Л.И. Маркашова, В.Р. Рябов, В.В. Стаценко и др. // Автоматическая сварка. 1995. № 8. С. 35—38.
4. **Добаткин В.И.** Избранные труды. М.: ВИЛС, 2001. 668 с.
5. **Овчинников В.В., Андреева Л.П., Любимова Т.Д.** Оксидные включения в швах алюминиевых сплавов, полученных методом сварки трением с перемешиванием // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. № 6. С. 3—13.
6. **Влияние** размера зерна листов из сплава 1565чМ на структуру и свойства соединений, полученных СТП / А.М. Дриц, В.В. Овчинников, А.В. Михайловская, М.С. Кищик // Технология легких сплавов. 2016. № 3. С. 36—43.
7. **Овчинников В.В., Андреева Л.П.** Влияние температуры испытаний на свойства соединений сплава 1565ч, выполненных сваркой трением с перемешиванием // Технология металлов. 2016. № 10. С. 12—17.
8. **Дриц А.М., Овчинников В.В.** Сварка алюминиевых сплавов. М.: Руда и металлы, 2017. 440 с.

Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук,
vikov1956@mail.ru;
Антон Михайлович Губин;
Ирина Александровна Курбатова, канд. техн. наук



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

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

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

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

zp418.indd 161 05.04.2018 12:25:15

УДК 621.98

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

Построение математической модели процесса гибки листовых заготовок с использованием бабы листоштамповочного молота с наполнителем

На основе метода многофакторного планирования эксперимента построена математическая модель процесса гибки листовой заготовки стандартной бабой молота и бабой молота с наполнителем в виде уравнений регрессии, определяющих зависимость угла упругого пружинения заготовки от относительного радиуса гибки, направления прокатки заготовки, размеров и массы шариков наполнителя бабы.

Ключевые слова: листовая штамповка; метод многофакторного планирования эксперимента; математическая модель; уравнение регрессии; одноугловая гибка; упругое пружинение; листоштамповочный молот; баба молота с наполнителем.

The mathematic model of bending of sheet blank by standard ram and hammer ram with fillet is developed by application of multifactor experiment method. This model in the form of regression equation allows to calculate the angle of elastic springback depending on relative radius of bending, rolling direction of blank, size and mass of balls of fillets.

Keywords: sheet metal forming; multifactor experiment method; mathematic model; regression equation; bending; elastic springback; stamping hammer; hammer ram with fillet.

Введение. Для производства деталей авиационной техники из различных материалов в условиях мелко- и среднесерийного производств широко применяют гибку листовых заготовок на листоштамповочных молотах. Основными недостатками листоштамповочных молотов являются низкий КПД ударного деформирования заготовки и низкая точность изготовляемых деталей вследствие их упругого пружинения, которое обычно устраняют ручной доводкой, что ухудшает качество поверхности детали и увеличивает трудоемкость.

Одно из направлений повышения размерной точности деталей и снижения упругого пружинения при гибке на листоштамповочных молотах — увеличение продолжительности ударного взаимодействия инструмента и заготовки удержанием падающих частей молота в нижней точке при ударе при использовании специальных устройств [1—3].

Проведенные ранее исследования процесса гибки листовых заготовок из стали Ст3 толщиной 1 мм на молоте при использовании бабы молота (копра) с наполнителем позволили установить увеличение продолжительности удара (до 1,5 раза) и снижение угла упругого пружинения до 2,5 раза по сравнению со стандартной бабой молота (копра) и выявить предпосылки к дальнейшим исследованиям процесса ударной гибки для исследования зависимости упругого пружинения от параметров бабы молота с наполнителем [1, 3].

Экспериментальные исследования. Гибку заготовок и определение параметров удара проводили на специальном комплексе для экспериментальных исследований процесса гибки на молоте (копре), принципиальная схема которого приведена на рис. 1.

Комплекс состоит из вертикального копра *1* с установленным на нем экспериментальным штампом *2* и системы высокоскоростной

zp418.indd 162 05.04.2018 12:25:15

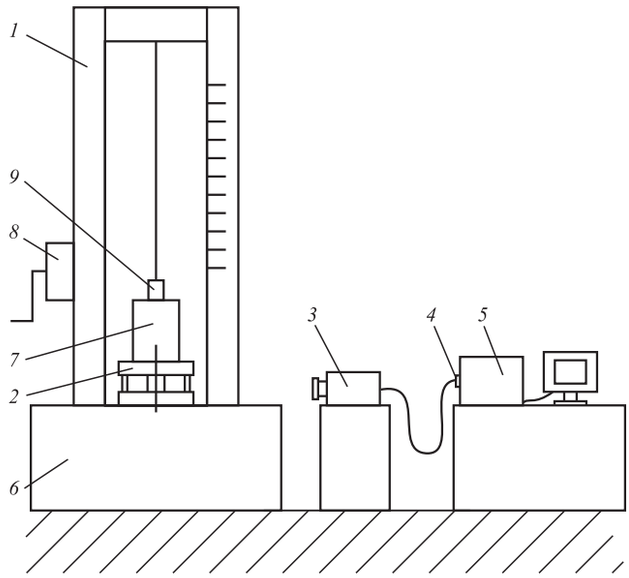


Рис. 1. Принципиальная схема комплекса для экспериментальных исследований процесса гибки на молоте (копре):

1 — вертикальный копер; *2* — штамп; *3* — высокоскоростная цифровая видеокамера; *4* — переходник; *5* — персональный компьютер; *6* — основание; *7* — баба; *8* — устройство подъема бабы; *9* — устройство захвата бабы

видеосъемки, включающей камеру высокоскоростной видеосъемки *3* со встроенным модулем буферной памяти, переходник *4* для интерфейса с камерой и персональный компьютер *5* для управления, предварительной обработки, записи и хранения видеоинформации.

Вертикальный копер *1* состоит из двух стоек и основания *6*, сменной бабы *7*, устройства для подъема *8* и захвата *9* для фиксации бабы. При подъеме бабы на необходимую высоту захват отпускают, и баба падает на верхнюю плиту штампа *2*, деформируя при этом заготовку.

Одновременно с началом движения бабы с помощью персонального компьютера включают ввод изображения исследуемой зоны в буферную память камеры высокоскоростной видеосъемки *3*. Видеозапись осуществляли с частотой 3000 кадров/с.

Гибку проводили на экспериментальном штампе. Угол пуансона принят равным $\alpha = 60$, 90 и 120°, радиус пуансона $R = 1$, 3 и 5 мм.

Для гибки использовали листовые заготовки из стали 10 толщиной $S = 2$ мм и размерами 30×40 мм с различным направлением прокатки (вдоль и поперек длинной стороны заготовки). Гибку осуществляли пуансоном поперек длинной стороны заготовки.

Для гибки заготовок на копре использовали стандартную бабу массой $m_б = 22{,}4$ кг, изготовленную из стали 45 (ГОСТ 1050—88).

Также для гибки заготовок применяли бабу с наполнителем [4, 5], состоящую из корпуса с внутренней полостью и засыпаемых внутрь нее шариков диаметрами 0,001; 0,006 и 0,012 м из стали ШХ15. Материал корпуса бабы — сталь 45 (ГОСТ 1050—88). Между крышкой *1* бабы с наполнителем и шариками *4* установлена упругая прокладка *2* из поролона, обеспечивающая предварительное упругое поджатие шариков в бабе (рис. 2).

Масса корпуса бабы 14,5 кг; отношение массы шариков к общей массе бабы $K_м = 0{,}11$; 0,21 и 0,31.

Для сравнения результатов экспериментов по гибке заготовок стандартной бабой и бабой с наполнителем их массы приняли одинаковыми и равными $m_б = 22{,}4$ кг. Для этого в бабе с наполнителем использовали крышки массой 6,307; 4,855 и 3,405 кг, которые компенсировали недостаток массы бабы.

Для проведения экспериментальных исследований процесса гибки листовых заготовок стандартной бабой молота и бабы молота с наполнителем с использованием метода многофакторного планирования эксперимента были составлены матрицы планов экспериментов. В качестве варьируемых факторов были приняты относительный радиус гибки R/S, угол гибки α, отношение массы шариков к массе бабы $K_м$ и отношение массы одного шарика

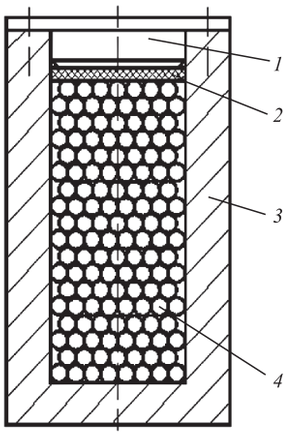


Рис. 2. Схема бабы с наполнителем:

1 — крышка; *2* — упругая прокладка; *3* — корпус; *4* — шарики

zp418.indd 163 05.04.2018 12:25:15

к массе бабы молота $K_{1м}$. Матрицы планов экспериментов представлены в табл. 1 и 2.

В табл. 3 приведены результаты экспериментов по гибке заготовок с различным направлением прокатки (вдоль и поперек длинной стороны заготовки) стандартной бабой молота и бабой молота с наполнителем.

Можно отметить существенное уменьшение угла упругого пружинения почти во всех экспериментах (до 4,5 раз) при использовании бабы молота с наполнителем.

При этом при использовании бабы молота с наполнителем отскок пуансона от заготовки после гибки отсутствовал во всех экспериментах.

Построение математических моделей процесса гибки листовых заготовок. На основе полученных экспериментальных данных были построены математические модели процесса гибки листовых заготовок стандартной бабой и бабой молота с наполнителем в виде уравнений регрессии, определяющие зависимости угла пружинения от угла гибки и относительного радиуса гибки, направления прокатки заготовки, размеров и массы шариков наполнителя бабы.

1. Матрица плана эксперимента для стандартной бабы молота

Номер опыта	R/S	α, °
1	0,5	60
2	1,5	
3	2,5	
4	0,5	90
5	1,5	
6	2,5	
7	0,5	120
8	1,5	
9	2,5	

2. Матрица плана эксперимента для бабы молота с наполнителем

Номер опыта	R/S	α, °	$K_м$	$K_{1м}$, 10^{-6}
1	0,5	60	0,11	1,5
2	1,5		0,21	40
3	2,5		0,31	300
4	0,5	90	0,21	300
5	1,5		0,31	1,5
6	2,5		0,11	40
7	0,5	120	0,31	40
8	1,5		0,15	300
9	2,5		0,25	1,5

Математическая модель процесса гибки стандартной бабой молота:

вдоль направления прокатки

$$y=\Delta\alpha=2,181+0,3x_1-1,172x_2+ +0,053z_1+0,969z_2-0,327x_1x_2; \quad (1)$$

поперек направления прокатки

$$y=\Delta\alpha=1,937+0,253x_1-1,032x_2+ +0,075z_1+0,683z_2-0,292x_1x_2, \quad (2)$$

где $x_1 = 1(X_1 - 1,5)$; $x_2 = 0,03(X_2 - 90)$; $z_1=2\left(x_1^2-0,67\right)$; $z_2=2\left(x_2^2-0,67\right)$; X_1— относительный радиус гибки R/S; X_2 — угол гибки.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости угла пружинения от угла гибки и относительного радиуса гибки при гибке стандартной бабой молота, построенные с использованием уравнений (1) и (2).

В результате анализа построенных зависимостей (см. рис. 3 и 4) было установлено уменьшение угла пружинения Δα при увеличении угла гибки α и относительного радиуса гибки R/S, но при α >110° и R/S > 2 угол пружинения практически не изменяется при дальнейшем увеличении α и R/S. При этом Δα до 1,5 раз меньше при гибке заготовок с направлением прокатки поперек, чем при гибке заготовок с направлением прокатки вдоль.

Математическая модель процесса гибки бабой молота с наполнителем:

вдоль направления прокатки

$$y=1,25+0,3x_1-0,5x_2+0,3x_3+0,3x_4; \quad (3)$$

поперек направления прокатки

$$y=1,1+0,15x_1-0,3x_2+0,1x_3+0,1x_4, \quad (4)$$

где $x_1 = 1(X_1 - 1,5)$; $x_2 = 0,03(X_2 - 90)$; $x_3 = 10(X_3 - 0,21)$; $x_4 = 6700,17(X_4 - 0,00011)$; X_3 — отношение массы шариков к массе бабы $K_м$; X_4 — отношение массы одного шарика к массе бабы молота $K_{1м}$.

zp418.indd 164 05.04.2018 12:25:15

3. Результаты экспериментов

Номер опыта	Стандартная баба				Баба молота с наполнителем			
	Направление прокатки							
	вдоль		поперек		вдоль		поперек	
	Δα, °	*t*, мс	Δα, °	*t*, мс	Δα, °	*t*, мс	Δα, °	*t*, мс
1	3,50	13,33	3,00	13,66	0,78	Нет отскока пуансона	0,80	Нет отскока пуансона
2	3,75	16,66	3,19	15,33	3,86		3,33	
3	4,75	14,66	4,08	15,00	4,30		4,25	
4	0,75	16,66	0,83	18,00	0,90		0,80	
5	0,91	12,00	1,01	14,00	0,92		0,85	
6	1,00	16,66	1,24	15,33	0,95		0,92	
7	1,50	18,00	1,37	15,00	0,97		1,33	
8	1,66	16,66	1,31	22,00	1,25		1,31	
9	1,80	16,66	1,40	21,66	0,70		1,25	

Примечание. При гибке заготовок стандартной бабой молота во всех экспериментах имеет место отскок пуансона

Обозначения: Δα — угол пружинения; *t* — продолжительность удара.

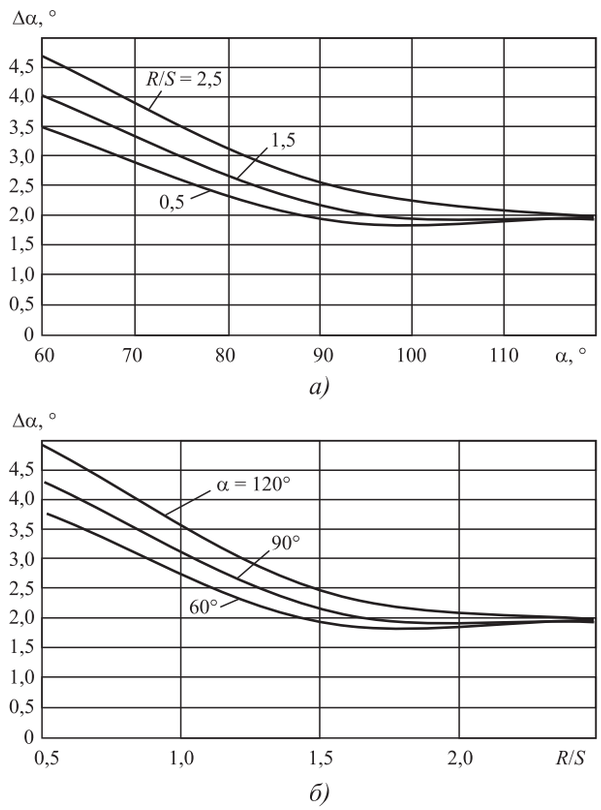


Рис. 3. Зависимости угла пружинения Δα от угла гибки α (*а*) и относительного радиуса гибки *R/S* (*б*) при использовании стандартной бабы молота (направление прокатки — вдоль)

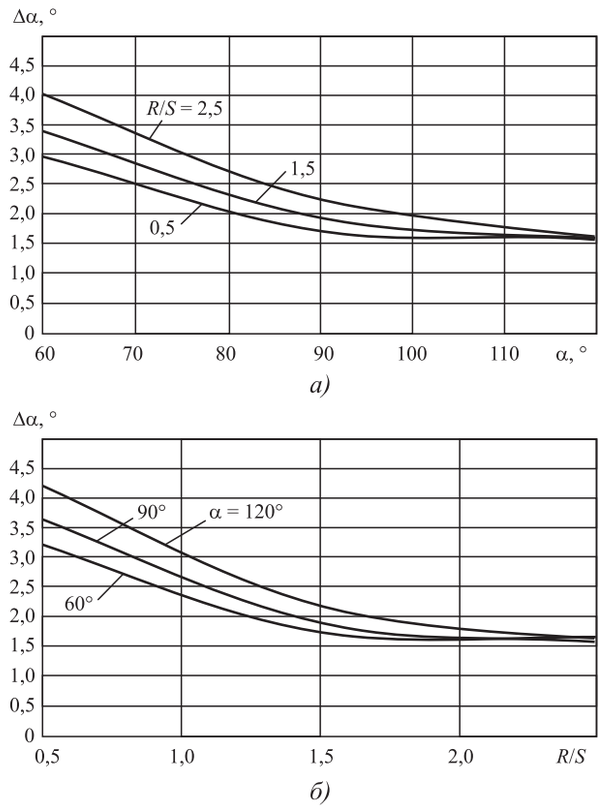


Рис. 4. Зависимости угла пружинения Δα от угла гибки α (*а*) и относительного радиуса гибки *R/S* (*б*) при использовании стандартной бабы молота (направление прокатки —поперек)

zp418.indd 165 05.04.2018 12:25:16

На рис. 5—7 представлены зависимости угла пружинения Δα от отношения массы шариков наполнителя к массе бабы $K_м$ при различных значениях угла гибки и относительного радиуса гибки, направления прокатки заготовки, размеров шариков наполнителя при гибке бабой молота с наполнителем, построенные с использованием уравнений (3) и (4).

В результате анализа построенных зависимостей (см. рис. 5—7) было установлено, что:

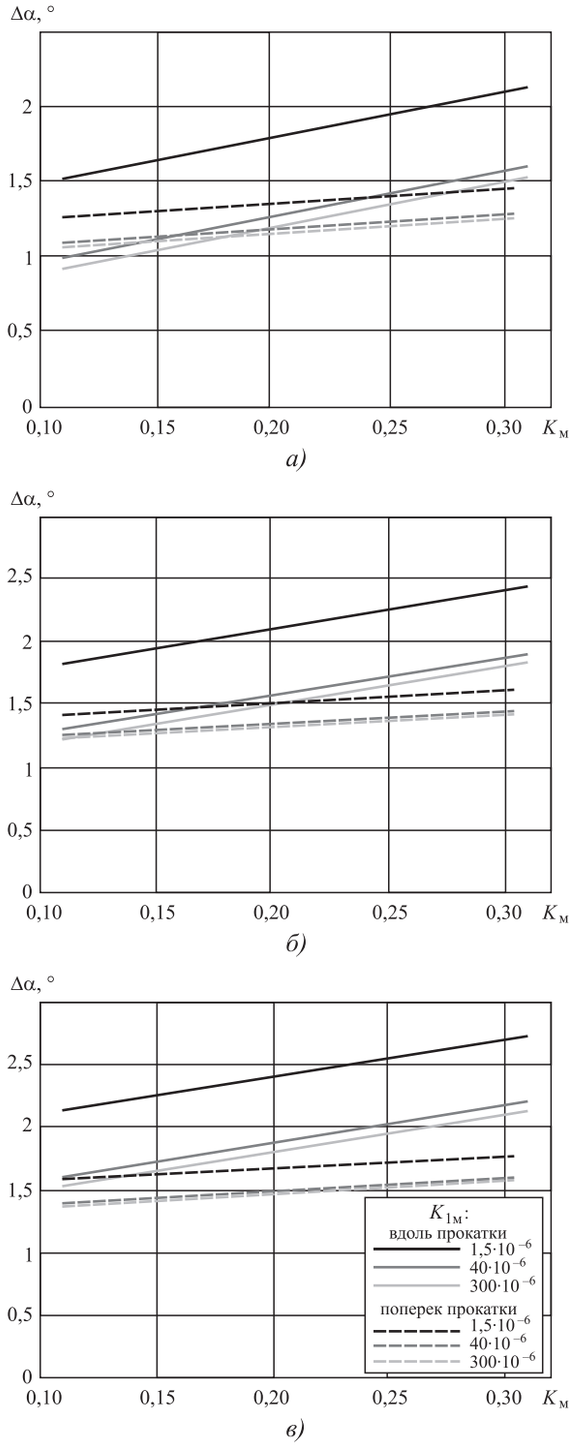


Рис. 5. Зависимости угла пружинения Δα от $K_м$ при угле гибки α = 60° при гибке бабы молота с наполнителем:
а — R/S = 0,5; *б* — R/S = 1,5; *в* — R/S = 2,5

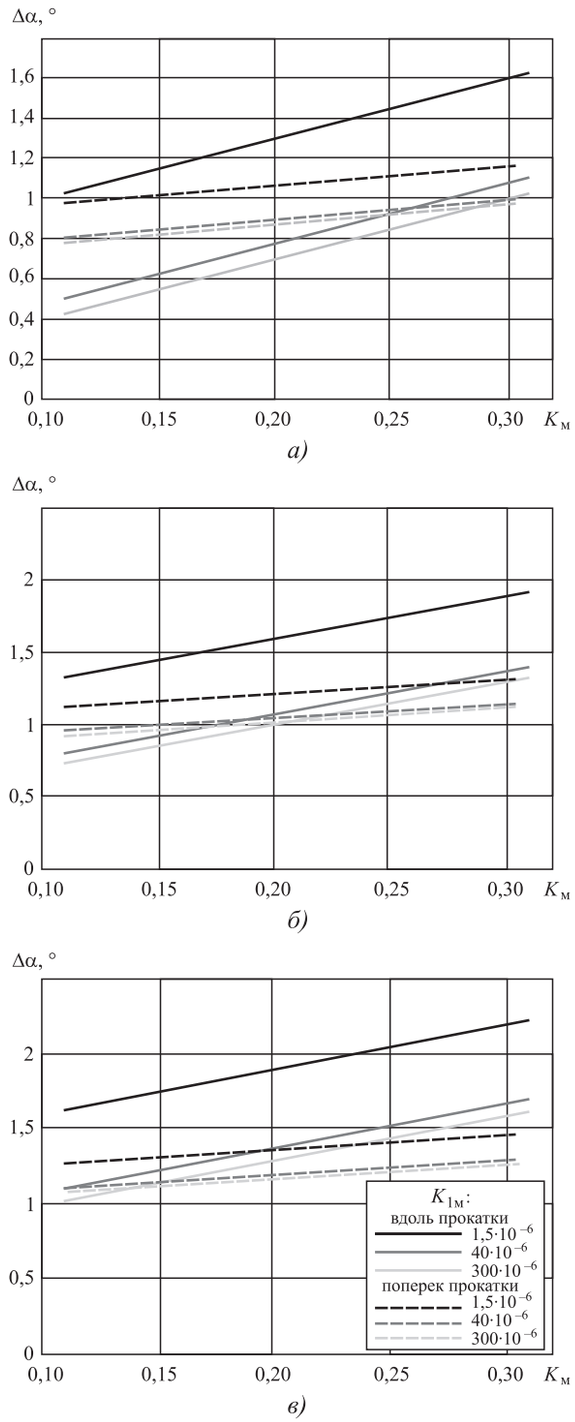


Рис. 6. Зависимости угла пружинения Δα от $K_м$ при угле гибки α = 90° при гибке бабы молота с наполнителем:
а — R/S = 0,5; *б* — R/S = 1,5; *в* — R/S = 2,5

zp418.indd 166 05.04.2018 12:25:16

- при гибке на угол 60°, при повышении $K_м$ угол пружинения $\Delta\alpha$ увеличивается примерно в 1,5 раза при всех $K_{1м}$;
- при повышении R/S от 0,5 до 1,5 при всех углах гибки угол пружинения $\Delta\alpha$ увеличивается до 1,5 раза при всех $K_м$ и $K_{1м}$;

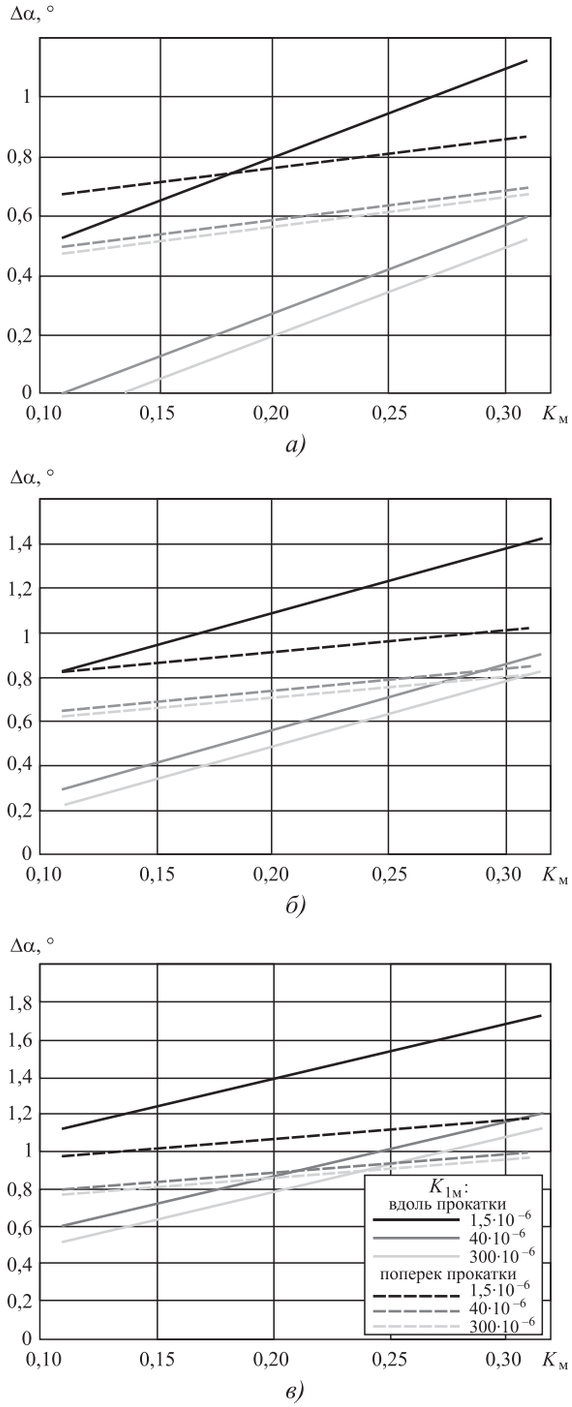


Рис. 7. Зависимости угла пружинения $\Delta\alpha$ от $K_м$ при угле гибки α = 120° при гибке бабы молота с наполнителем:
а — R/S = 0,5; *б* — R/S = 1,5; *в* — R/S = 2,5

- угол пружинения $\Delta\alpha$ уменьшается до 1,3 раза при гибке заготовок с направлением прокатки поперек при всех α, R/S, $K_м$ и $K_{1м}$.

При этом угол пружинения минимален при наименьших значениях $K_м$ и $K_{1м}$.

Таким образом, для проведения гибки заготовок с минимальным пружинением наиболее целесообразно использовать бабу молота с наполнителем с отношением массы шариков к массе бабы $K_м \geqslant 0{,}1$ и отношением массы одного шарика к массе бабы $K_{1м} \geqslant 1{,}5\cdot10^{-6}$. Выбор конкретных значений данных параметров необходимо проводить с учетом конструктивных особенностей бабы листоштамповочного молота.

Использование $K_м \leqslant 0{,}1$ может привести к снижению эффекта уменьшения пружинения при использовании бабы с наполнителем, так как наполнитель будет представлять из себя практически сплошное тело с корпусом бабы молота, в частности, применение песка в качестве наполнителя бабы молота никак не влияло на пружинение по сравнению с гибкой стандартной бабой молота.

Выводы

1. При гибке заготовок бабой молота с наполнителем угол упругого пружинения заготовки уменьшается до 4,5 раз при полном отсутствии отскока инструмента от заготовки ("прилипающий" удар) по сравнению с гибкой стандартной бабой молота.

2. С помощью метода многофакторного планирования эксперимента построены математические модели процесса гибки на молоте в виде уравнений регрессии, определяющих зависимость угла упругого пружинения заготовки от относительного радиуса гибки, направления прокатки заготовки, размеров и массы шариков наполнителя бабы.

3. Уменьшение пружинения при гибке заготовок бабой молота с наполнителем происходит вследствие изменения процесса ударного взаимодействия инструмента и заготовки, при котором отсутствует отскок пуансона от заготовки, что приводит к продолжению действия силы на заготовку со стороны инструмента.

Подобный эффект возможен при проведении некоторых технологических операций, например, подчеканки и калибровки, для

zp418.indd 167 05.04.2018 12:25:16

придания листовым деталям заданных размеров после гибки.

4. Для проведения гибки заготовок с минимальным пружинением наиболее целесообразно использовать бабу молота с наполнителем со следующими параметрами: отношение массы шариков к массе бабы $K_м \geqslant 0{,}1$ и отношение массы одного шарика к массе бабы $K_{1м} \geqslant 1{,}5 \cdot 10^{-6}$.

Выбор конкретных значений данных параметров необходимо проводить с учетом конструктивных особенностей бабы листоштамповочного молота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лавриненко В.Ю., Чуваев И.С.** Экспериментальные исследования гибки листовых заготовок на молотах // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 3 (317). С. 133—136.

2. **Лавриненко В.Ю.** Модернизация технологических машин ударного действия // Ремонт, восстановление, модернизация. 2017. № 2. С. 28—30.

3. **Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р., Чуваев И.С.** Исследование зависимости упругого пружинения при гибке листовых заготовок от параметров бабы листоштамповочного молота с наполнителем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 3 (323). С. 39—43.

4. **Пат. 2438825 РФ.** Баба молота / А.Е. Феофанова, В.А. Демин, С.А. Евсюков, В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов. Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

5. **Заявка** на патент на полезную модель РФ № 2017146810 от 28.12.2017 г. / В.Ю. Лавриненко, В.А. Демин, И.Е. Семенов, Р.Р. Шагалеев.

Владислав Юрьевич Лавриненко, д-р техн. наук,
vlavrinenko@bmstu.ru;
Руслан Ринатович Шагалеев

УДК 621.970.134

Е.Н. Складчиков, Т.Ю. Артюховская, С.С. Трух
(Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана)

Автоматическая компенсация износа фрикционных элементов муфт включения кривошипных прессов

Рассмотрена конструкция устройства автоматической компенсации износа фрикционных элементов муфт включения кривошипных прессов, позволяющего сохранять постоянным ход поршня пневмоцилиндра муфты независимо от износа фрикционных элементов. Этим исключаются необходимость остановки пресса для профилактических работ, возможность сдваивания ходов пресса, перегрузка фрикционных элементов динамическими силами в момент их смыкания.

Ключевые слова: кривошипный пресс; муфта; фрикционный элемент; износ; математическое моделирование.

The design of device of the automatic compensation for wear of engage clutches friction elements of crank presses allowing to maintain constant piston distance of clutch pneumatic cylinder regardless of the wear of the friction elements is considered. This eliminates the need to stop of press for maintenance works, the possibility of doubling moves press, overload of friction elements by dynamic forces at the time of their closing.

Keywords: crank presses; clutch; friction element; wear; mathematical modelling.

Муфты кривошипных прессов в большинстве случаев включаются с помощью пневматического цилиндра *1* (рис. 1, *а*). Износ фрикционных элементов *2* приводит к увеличению хода поршня *3* пневматического цилиндра и его вредного пространства. При этом увеличиваются время включения муфты и время опорожнения цилиндра при истечении из него воздуха, что может привести к сдваиванию ходов пресса. Повышается скорость поршня при закрытии зазоров между фрикционными элементами муфты. Закрытие зазоров приобретает ударный характер, что уменьшает долговечность фрикционных элементов.

zp418.indd 168 05.04.2018 12:25:16

Для предотвращения нежелательных последствий износа фрикционных элементов муфты снабжаются пакетами съемных проставок *4* (см. кн.: Власов В.И. Системы включения кривошипных прессов. М.: Машиностроение, 1969. 272 с.; Игнатов А.А., Власов В.И. Муфты, тормоза и механизмы управления кривошипных кузнечно-прессовых машин. М.: Машгиз, 1963. 448 с.). При увеличении хода поршня удаляется одна из проставок каждого пакета, и ход поршня возвращается к исходному значению. Однако это связано с остановкой пресса в его работе и уменьшением числа получаемых поковок.

Снабжение муфты устройством автоматической компенсации износа ее фрикционных элементов исключает необходимость остановки пресса для восстановления хода поршня. Он постоянно корректируется в процессе износа фрикционных элементов, сохраняя свое исходное значение.

Устройство автоматической компенсации износа фрикционных элементов муфты (рис. 1, *б*) включает стопорные блоки *1*, размещенные в крышке муфты *2*, и нажимные блоки *3* — в поршне цилиндра *4*. Нажимные блоки передают движение поршня нажимному кольцу *5* при включении муфты. Каждый из блоков содержит корпус *6*, шток *7*, прикрепленный к нажимному кольцу, разрезные сухари *8* и пружины *9*, удерживающие сухари в контакте с внутренней конической поверхностью корпуса. Угол ее конусности выбирается таким, чтобы силы трения между штоком и сухарями препятствовали перемещению штока в направлении меньшего диаметра конической поверхности корпуса (на рис. 1, *б* — справа налево), но позволяли его перемещение в противоположном направлении.

Корпусы стопорных блоков имеют возможность перемещения в крышке муфты на зазор Δ. Этот зазор должен быть равен ходу поршня при отсутствии износа фрикционных элементов. Между поршнем и нажимным кольцом установлены пружины *10*.

На рис. 2 показана работа устройства автоматической компенсации износа фрикционных элементов муфты, его работа при отсутствии износа (1*а*, 1*б*, 1*д*) и при наличии износа (2*а*—2*д*), где:

1*а*, 2*а* — исходное состояние, начало включения муфты;

1*б* — муфта включена, износ фрикционных элементов отсутствует; 2*б* — включение муфты в момент выборки зазора Δ стопорного блока при износе фрикционных элементов. Корпус стопорного блока останавливается, а нажимное кольцо вместе со штоком стопорного блока продолжит движение на расстояние *H* до закрытия увеличенных вследствие износа зазоров между фрикционными элементами;

2*в* — муфта включена, фрикционные элементы изношены;

2*г* — фрикционные элементы изношены. Нажимное кольцо вместе со штоками стопорного и нажимного блоков совершают обратное перемещение на расстояние Δ до упора стопорного блока в его крышку. Стопорный блок, нажимное кольцо вместе со штоками блоков останавливаются. Нажимное кольцо остается в новом положении, при котором следующее включение муфты происходит с восстановленным ходом поршня. Поршень под действием его пружины продолжает движение в исходное состояние;

1*д* — конечное состояние. Муфта выключена, износ фрикционных элементов отсутствует; 2*д* — конечное состояние. Муфта выключена, фрикционные элементы изношены. Поршень муфты возвратился в исходное положение. Нажимное кольцо получило новое положение, смещенное относительно исходного на величину компенсации износа фрикционных элементов *H*.

Работоспособность устройства автоматической компенсации износа фрикционных элементов муфты была проверена математическим моделированием применительно к листоштамповочному прессу двойного действия К460 с номинальной силой 0,63/0,4 МН [1].

Кинематическая схема пресса приведена на рис. 3, а топология его математической модели в среде программного комплекса анализа динамических систем Pa9 [2] — на рис. 4. На топологии в виде графических образов показаны математические модели типовых конструктивных элементов, извлекаемых из библиотеки моделей комплекса Pa9, и функциональные связи между ними.

Поэлементное соответствие кинематической схемы пресса и его топологии в математической модели приведено в таблице.

Стопорный блок *1* (см. рис. 1, *б*) устройства автоматической компенсации износа фрикционных элементов муфты в топологии математической модели пресса представлен элементами: пара "корпус—сухари" — моделью винтовой пары VNTPR*, обозначенной СБ; пара "сухари—шток" — моделью направляющей NPR, обозначенной ССБ; пружина сухарей —

* Представление поступательной пары "корпус—сухари" моделью винтовой пары правомерно, поскольку вращательные координаты винтовой пары могут интерпретироваться как поступательные при соответствующем пересчете параметров вращательного движения в параметры поступательного движения.

zp418.indd 169 05.04.2018 12:25:16

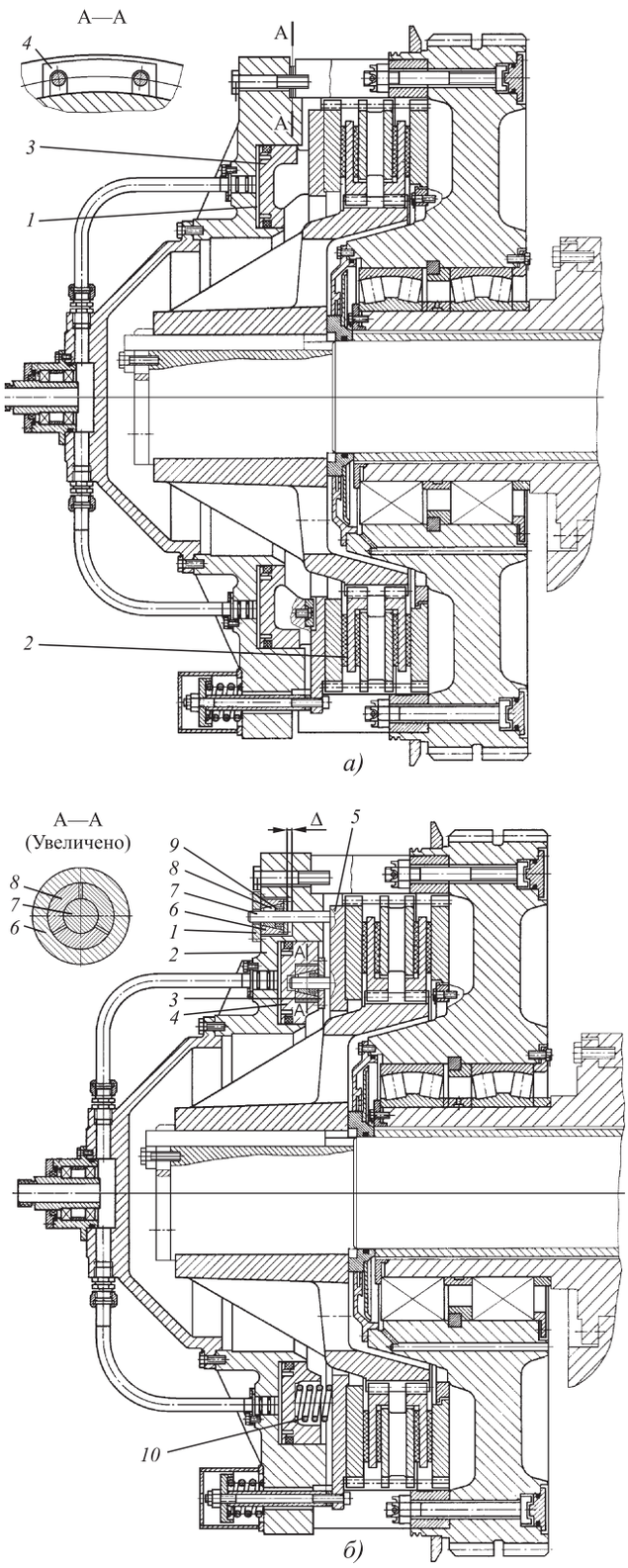


Рис. 1. Конструкция муфты включения кривошипного пресса:

а — с пакетами компенсационных проставок; *б* — с устройством автоматической компенсации износа фрикционных элементов

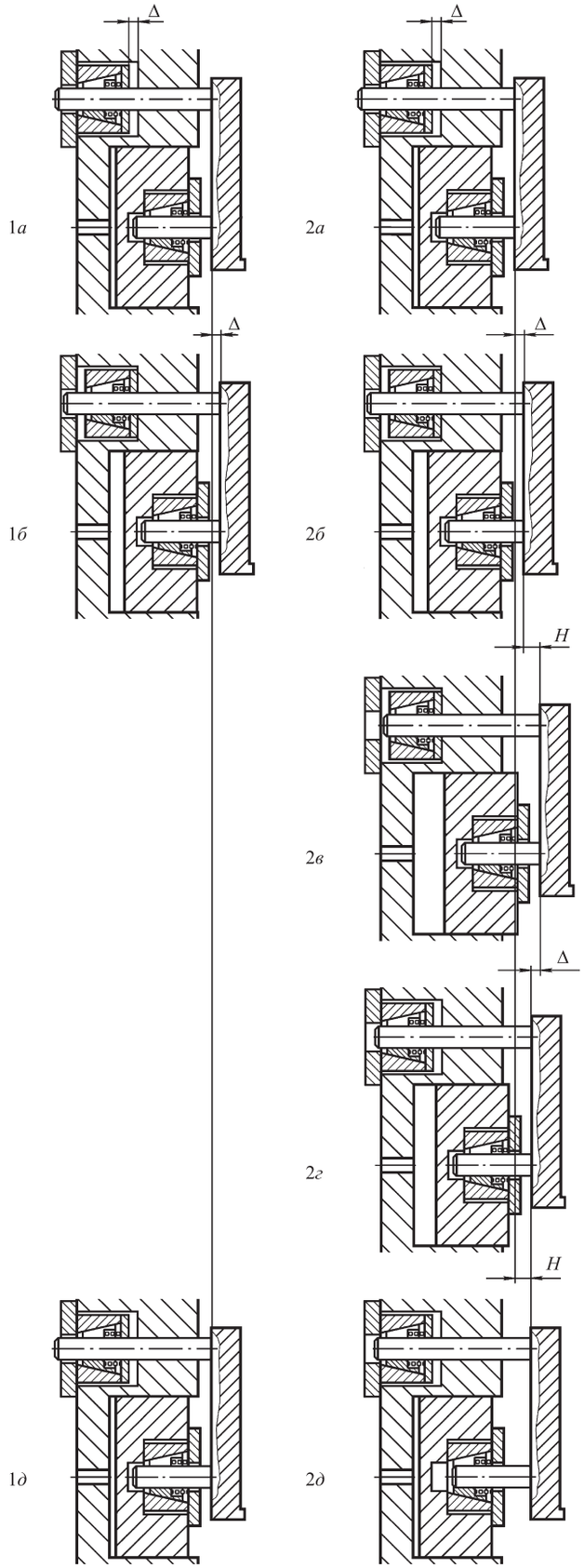


Рис. 2. Работа устройства автоматической компенсации износа фрикционных элементов муфты

zp418.indd 170 05.04.2018 12:25:16

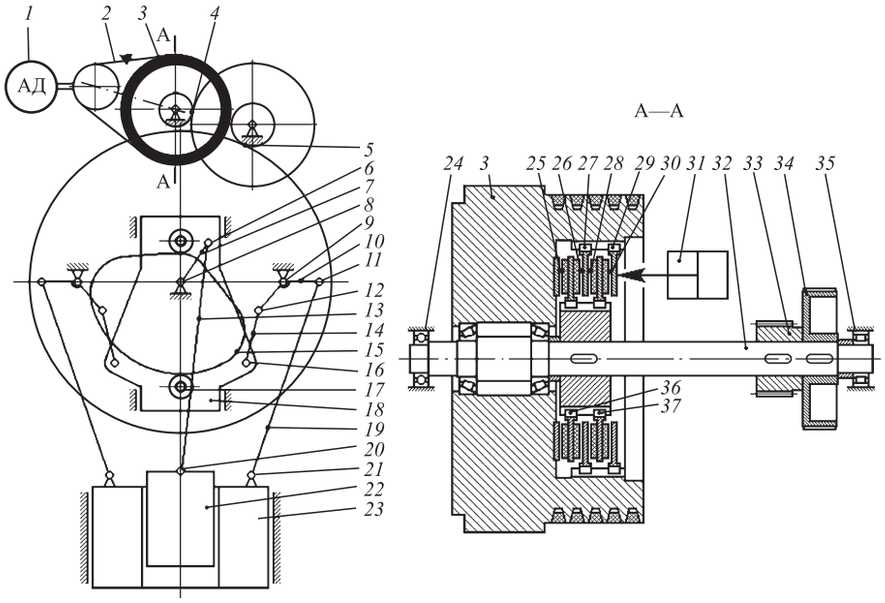


Рис. 3. Кинематическая схема пресса К460

моделью линейной упругости К, обозначенной ПССБ; зазор Δ — моделью двухстороннего упора UPRLD, обозначенной "ЗАЗОР Δ".

Нажимной блок в топологии модели пресса представлен моделями, обозначенными НБ, СНБ, ПСНБ, пружина поршня *10* (см. рис. 1, *б*) — моделью линейной упругости *К,* обозначенной ПП.

Результаты математического моделирования, выполненного для случая отсутствия износа фрикционных элементов муфты включения пресса, показаны на рис. 5, *а*. Масштабы графиков выводимых переменных определены значениями этих переменных на верхней и нижней границах поля графиков, указанных в соответствующих полях окна результатов. Режим отсутствия износа фрикционных элементов обеспечивался заданием зазора Δ (см. рис. 2), равным сумме зазоров четырех фрикционных пар муфты, представленных моделями в топологии FRM1—FRM4. Все указанные зазоры вводятся как параметры соответствующих моделей. Зазор Δ принят равным 4 мм, зазор каждой фрикционной пары — 1 мм.

Поэлементное соответствие кинематической схемы пресса и его топологии в математической модели

Номер позиции элемента на рис. 3	Элемент	Обозначение элемента(ов) на топологии	Имя привлеченной модели
1	Двигатель асинхронный	DV	DVA
2	Клиноременная передача	КРП	KLRMP
3	Маховик	МАХОВИК 47, МАССА И СИЛА ТЯЖ. MAX 710	M, MV
25, 26, 28, 30	Фрикционные пары муфты	FRM1, FRM2, FRM3, FRM4	FRMT
27, 29	Шлицевые соединения ведущих дисков	ШЛ.ВДЩ.ДИСКА 1, ШЛ.ВДЩ.ДИСКА 2	SHLITC
36,37	Шлицевые соединения ведомых дисков	ШЛ.ВДМ.ДИСКА 1, ШЛ.ВДМ.ДИСКА 2	
—	Пружины муфты	ПР	K
31	Пневмоцилиндр муфты	CLPN	CLPN
—	Подводящая головка муфты	ПОДВОД.ГОЛОВКА	RP32PN
—	Ресивер	RSVR	RSVR
—	Источник сжатого воздуха	КОМПР.	RTPN
—	Выход в атмосферу	АТМ.1, АТМ.2	RTPN
—	Элемент задержки включения муфты	ZDM	ZD

zp418.indd 171 05.04.2018 12:25:17

Окончание таблицы

Номер позиции элемента на рис. 3	Элемент	Обозначение элемента(ов) на топологии	Имя привлеченной модели
33	Шестерня	—	—
34	Тормоз	ТОРМОЗ	TORMOZ
—	Элемент задержки включения тормоза	ZDT	ZD
24, 35	Подшипники приводного вала	ПОДШ. 1, ПОДШ. 2	SHARN2
32	Приводной вал	УЧАСТОК ВАЛА 1, УЧАСТОК ВАЛА 2, УЧАСТОК ВАЛА 3	FRVL
4	Быстроходная зубчатая передача	БЫСТРОХ. ЗУБЧ. ПЕРЕД.	ZACPCN
5	Тихоходная зубчатая передача	ТИХОХ.ЗУБЧ.ПЕРЕД.	RDN
—	Станина	СТАНИНА	K
8	Подшипниковая опора коленчатого вала	ОПОРА КРИВОШИПА	SHARN2
7	Кривошип	КРИВОШИП	BALKA2
6	Кривошипная головка шатуна	КРИВОШ.ГОЛ.ШАТУНА	SHARN2
13	Шатун	ШАТУН	BALKA2
20	Ползунная головка шатуна	ПОЛЗ.ГОЛ.ШАТУНА	SHARN2
22	Вытяжной ползун в направляющих прижимного ползуна	ВЫТЯЖН.ПОЛЗУН	NPR
—	Технологическая сила	ТЕХН.НАГР.	TNGK
15	Кулачковый механизм привода прижимного ползуна	КУЛАК	KULMD
17	Подшипник ролика кулачкового механизма привода прижимного ползуна	ПОДШ.РОЛИКА	SHARN2
18	Ползун ролика кулачкового механизма в направляющих	ПОЛЗУН РОЛИКА	NPR
14	Серьга	СЕРЬГА	BALKA2
10	Коромысло	ПЛЕЧО 1 КОРОМЫСЛА, ПЛЕЧО 2 КОРОМЫСЛА	
19	Шатун прижимного ползуна	ШАТУН ПРИЖИМН.ПОЛЗУНА	
9	Подшипниковая опора коромысла	ОПОРА КОРОМЫСЛА	SHARN2
16	Шарнир механизма привода прижимного ползуна	ШАРНИР 1	
12		ШАРНИР 2	
11		ШАРНИР 3	
21		ШАРНИР 4	
23	Прижимной ползун в направляющих	ПРИЖИМН. ПОЛЗУН	NPR

Для каждого из трех циклов работы пресса, представленных в результатах моделирования ход AB нажимного кольца муфты при включении муфты равен возвратному ходу CD кольца.

Результаты математического моделирования, выполненного для случая наличия износа фрикционных элементов муфты включения пресса, показаны на рис. 5, *б*. Режим наличия износа фрикционных элементов обеспечи-

zp418.indd 172 05.04.2018 12:25:18

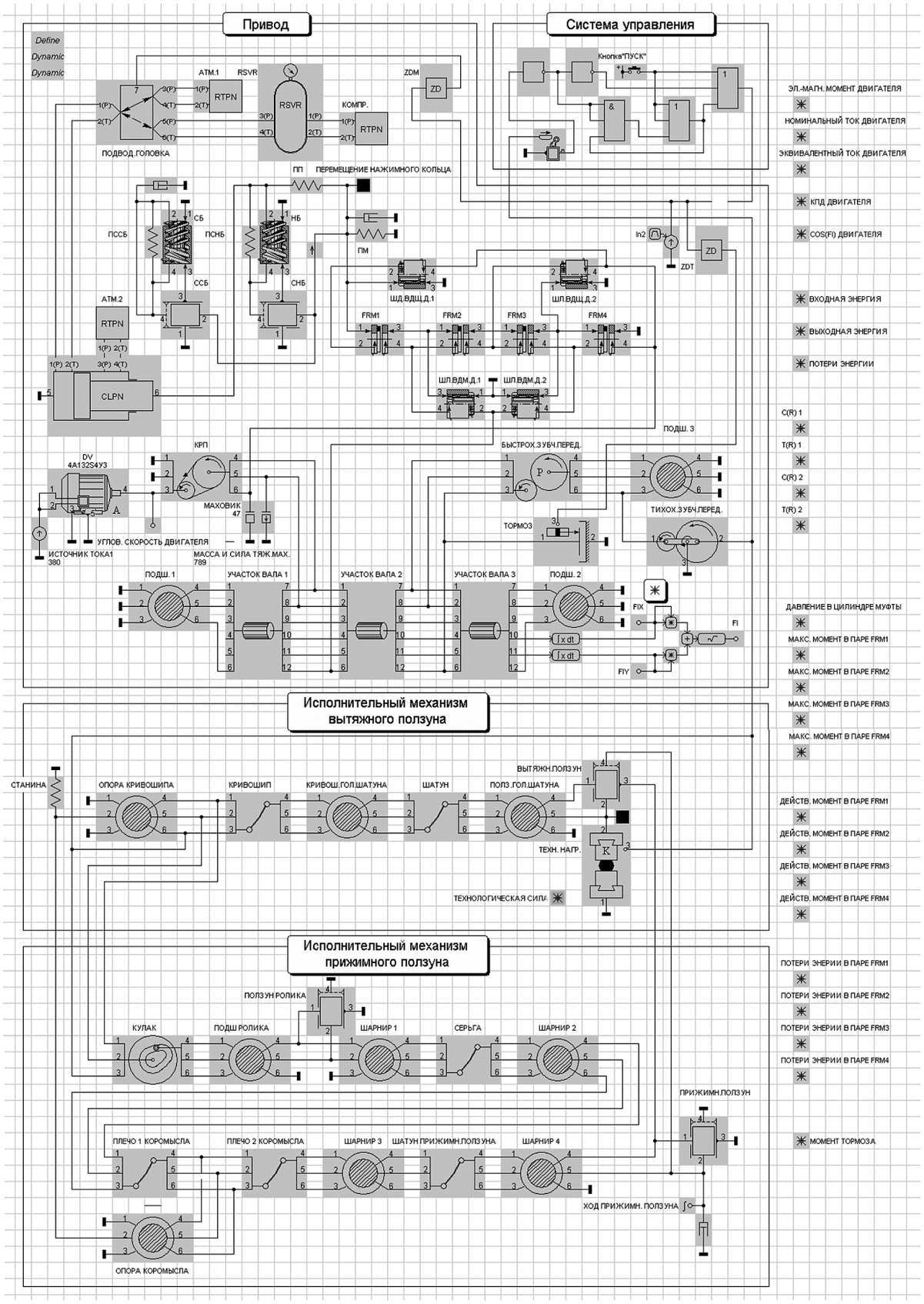
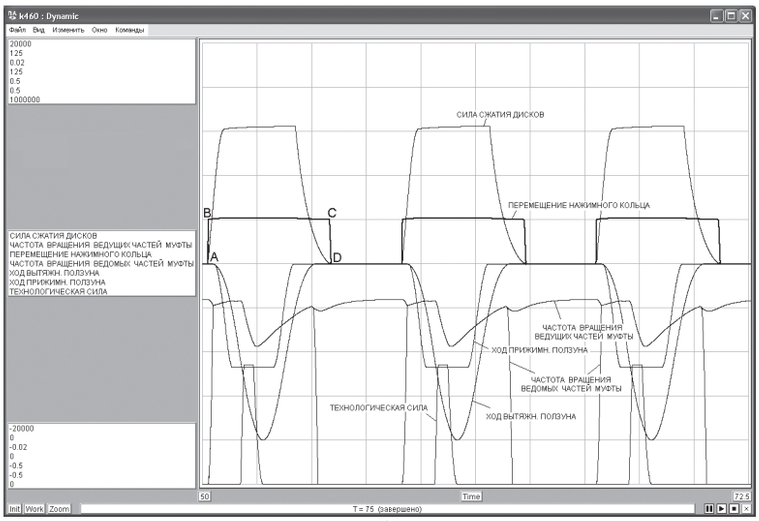
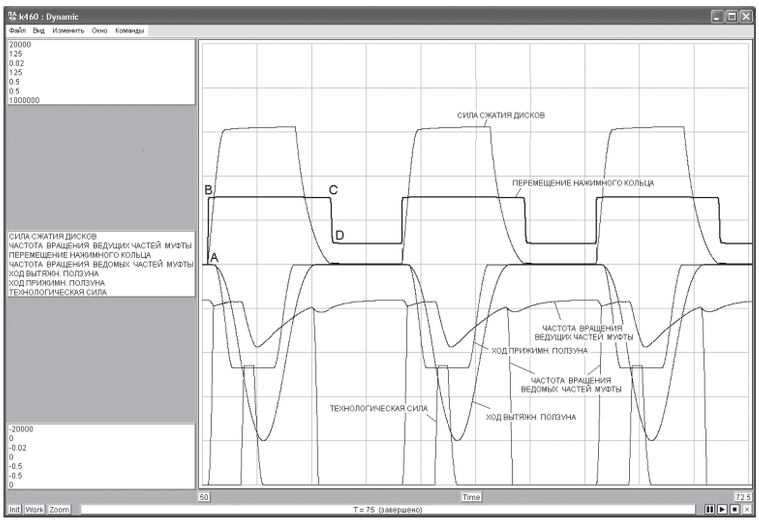


Рис. 4. Топология математической модели пресса К460

zp418.indd 173 05.04.2018 12:25:18



а)



б)

Рис. 5. Результаты математического моделирования работы пресса при отсутствии износа (*а*) и при износе (*б*) фрикционных элементов муфты включения

вался вводом значений увеличенных зазоров фрикционных пар муфты. Зазор **Δ** сохранен равным 4 мм, зазор каждой из четырех фрикционных пар — 1,5 мм, что в совокупности равно 6 мм. Это соответствует износу фрикционных пар 2 мм.

Согласно полученным результатам ход AB нажимного кольца при включении муфты в первом цикле работы пресса оказался увеличенным до совокупного зазора фрикционных пар, равного 6 мм. Возвратный ход CD нажимного кольца остался прежним, равным 4 мм. Нажимное кольцо получило новое начальное положение, при котором последующие циклы работы пресса происходят с равными значениями хода нажимного кольца при включении и выключении муфты.

Из полученных результатов моделирования следует, что при отсутствии и наличии износа фрикционных элементов устройство автоматической компенсации износа не нарушает работу системы включения и пресса, поскольку циклы работы пресса идентичны один другому.

Выводы

1. Рассмотренное устройство обеспечивает автоматическую компенсацию износа фрикционных элементов муфты, осуществляемой в процессе работы пресса, без его остановки и без уменьшения числа получаемых поковок.

2. Явление сдваивания ходов пресса за счет увеличенного объема рабочей полости пневмоцилиндра включения муфты при моделировании не обнаружено.

3. Устройство автоматической компенсации износа не нарушает работу системы включения и пресса.

4. Устройство автоматической компенсации износа фрикционных элементов муфты незначительно усложняет кривошипный пресс в конструктивном отношении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кузнечно-штамповочные** машины: сб. статей. Междунар. издательский дом LAP Lambert Academic Publishing, 2015. С. 42—56.

2. **Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н.** Кузнечно-штамповочное оборудование: учеб. для вузов / под ред. Л.И. Живова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 560 с.

Евгений Николаевич Складчиков, д-р техн. наук, ens_0@mail.ru;
Татьяна Юрьевна Артюховская, канд. техн. наук;
Сергей Сергеевич Трух

zp418.indd 174 05.04.2018 12:25:18

УДК 621.77

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

Математическое моделирование и сравнительный анализ деформированного состояния металла при асимметричной прокатке и равноканальном угловом прессовании*

На основе метода конечных элементов выполнены исследование и сравнительный анализ процесса равноканального углового прессования (РКУП) (простой сдвиг) и асимметричной листовой прокатки (совмещенный чистый и простой сдвиг) в условиях плоскодеформированного состояния металла. Установлено, что при оптимальных параметрах процесса асимметричной прокатки за один проход с обжатием ε = 60 % истинная деформация в материале заготовки может достигать e = 3,8...4,8 по толщине листа, что соответствует трем или четырем проходам РКУП. Показано, что при асимметричной прокатке поворотная мода деформации обеспечивает немонотонность течения металла, что является одним из ключевых признаков, позволяющих отнести данный способ обработки металлов давлением к методам интенсивной пластической деформации. При теплой (≈200 °С) деформации сплава АМг6 по схеме совмещенного простого и чистого сдвига при e = 4 среднее значение микротвердости возрастает с ≈800 до ≈1350 МПа, в то время как после четырех проходов РКУП по схеме простого сдвига микротвердость не превышает ≈1050 МПа. Результаты исследования могут быть полезны при разработке оптимальных режимов асимметричной листовой прокатки металлов и сплавов для формирования в них ультрамелкозернистой структуры.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование; асимметричная прокатка; метод конечных элементов; чистый сдвиг; простой сдвиг; поворотная деформация; интенсивная пластическая деформация; микротвердость.

Study and comparative analysis of equal channel anguar pressing (ECAP) (simple shear) and asymmetric sheet rolling (simultaneous pure and simple shear) are performed by the finite element method in the conditions of flatdeformed state of metal. It is found that with optimal parameters of single-pass asymmetric rolling with thickness reduction of ε ≈ 60 %, the true strain in the workpiece material can reach e = 3.8...4.8 through the sheet thickness, which corresponds to 3 or 4 passes of ECAP. It is shown that rotational deformation mode during asymmetric rolling provides non-monotonic flow of metal. It is one of the key features that allow using this process as severe plastic deformation method. At warm (≈200 °C) deformation of AMg6 alloy according to the scheme of simultaneous pure and simple shear corresponding to asymmetric rolling at e = 4 the average microhardness increases from ≈800 to ≈1350 MPa, while after 4 passes of ECAP by simple shear the microhardness does not exceed ≈1050 MPa. The results of the investigation can be useful for development of optimal regimes of asymmetric sheet rolling of metals and alloys with ultrafine grain structure.

Keywords: equal channel angular pressing; asymmetric rolling; finite element method; pure shear; simple shear; rotational deformation; severe plastic deformation; microhardness.

Введение. *Ультрамелкозернистые* (УМЗ) металлические материалы, обладающие повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами — предмет исследований ученых в области физики и механики материалов, а также обработки металлов давлением [1].

Одним из способов получения таких материалов являются методы *интенсивной пластической деформации* (ИПД), которые относятся к современным и развивающимся методам

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

zp418.indd 175 05.04.2018 12:25:19

обработки металлов давлением (ОМД) и являются развитием представлений о больших пластических деформациях.

Однако существующие методы ИПД, например, такие как равноканальное угловое прессование (РКУП), имеют конструктивно-технологические недостатки, ограничивающие возможности их широкого промышленного применения: малые размеры получаемых полуфабрикатов, сложность или невозможность получения полноразмерных листовых заготовок, низкую технологичность деформирования и, как следствие, существенные ограничения по производительности и экономической целесообразности использования таких технологий. Таким образом, в настоящее время актуальна разработка новых высокопроизводительных методов ИПД, желательно на базе известных процессов ОМД, например, прокатки, с использованием специальных механических схем деформирования, обеспечивающих достижение больших пластических деформаций материалов при относительно низких температурах [2].

Характер эволюции структуры металлов и сплавов при РКУП и, например, обычной прокатке с большой деформацией разный. В первом случае образуются зерна с гораздо большей долей высокоугловых границ, чем во втором. Различия в формировании структуры металлов и сплавов при РКУП и обычной прокатке обусловливаются процессом пластической деформации и условиями ее осуществления [1, 3]. Интенсивная пластическая деформация отличается от обычной существованием двух мод деформации — сдвига и связанного с ним пластического поворота [1, 3]. При этом различают чистый и простой сдвиги.

Если рассмотреть элементарную квадратную ячейку, то при чистом сдвиге квадрат $ABCD$ преобразуется в прямоугольник $A'B'C'D'$, а круг — в эллипс (рис. 1). Деформация является монотонной, так как происходят равномерное укорочение ячейки вдоль оси bd и равномерное ее удлинение вдоль оси ac, перпендикулярной к первой. Оси эллипса в этом случае практически не изменяют своего положения в пространстве, заготовка вытягивается в направлении, совпадающем с большим диаметром эллипса.

Чистый сдвиг при этом характеризуется углом сдвига φ, который связан с трансформацией квадрата $abcd$ в ромб $a'b'c'd'$ (см. рис. 1). Чистый сдвиг реализуется, например, при обычной листовой прокатке.

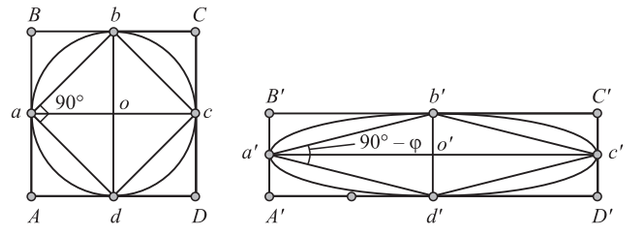


Рис. 1. Схема чистого сдвига при обычной листовой прокатке

Простой сдвиг сопровождается смещением всех точек тела параллельно одной оси. Квадрат $ABCD$ превращается в параллелограмм $A'B'C'D'$, основание и высота которого такие же, как и у исходного квадрата (рис. 2).

При простом сдвиге круг также трансформируется в эллипс, однако направление его осей при этом непрерывно меняется, т.е. происходит их поворот, а деформация является немонотонной. Сдвиговая деформация характеризуется углом сдвига φ. Простой сдвиг и связанный с ним пластический поворот характерны для методов ИПД, например, таких как РКУП [1, 3].

В последние годы методы ИПД получили новый импульс развития. Разработаны новые специальные способы листовой прокатки с целенаправленно создаваемой асимметрией процесса на основе использования рассогласования окружных скоростей валков, разницы диаметров, условий контактного трения и других факторов [4—6]. Особенностью процесса асимметричной листовой прокатки является возможность совмещения больших деформаций сжатия и сдвига, т.е. может быть реализована схема совмещенного простого и чистого сдвига (рис. 3).

Согласно этой схеме квадрат $ABCD$ трансформируется в параллелограмм $A'B'C'D'$, основание которого вытягивается, а высота укорачивается (рис. 3). При этом круг трансфор-

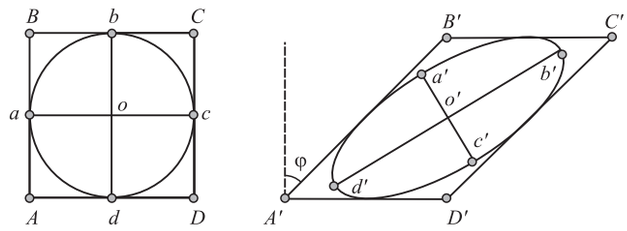


Рис. 2. Схема простого сдвига при РКУП

zp418.indd 176 05.04.2018 12:25:19

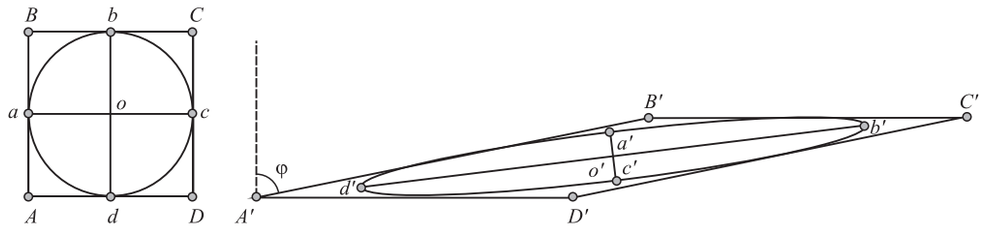


Рис. 3. Схема совмещенного простого и чистого сдвига при асимметричной листовой прокатке

мируется в эллипс, направление осей которого непрерывно меняется, происходит их поворот, а деформация является немонотонной. Сдвиговая деформация также характеризуется углом сдвига φ.

Предположено, что схема совмещенного простого и чистого сдвига, реализуемая при асимметричной листовой прокатке, более эффективная, чем схема простого сдвига, реализуемая при РКУП. Поэтому *цель работы* — математическое моделирование и сравнительный анализ деформированного состояния металла при асимметричной листовой прокатке и РКУП.

Методика проведения исследований. Одним из эффективных методов численного решения задач механики и кинематики деформируемого твердого тела является *метод конечных элементов* (МКЭ). Компьютерное моделирование и сравнительный анализ процессов РКУП и асимметричной листовой прокатки для условий плоской деформации проводили в двумерной постановке задачи с использованием специализированного инженерного программного комплекса DEFORM-2D.

Схема процесса РКУП представлена на рис. 4. Угол пересечения каналов 90°. Радиусы скруглений R = 2 мм; r = 1 мм. Толщина заготовки 8 мм, длина — 40 мм. Закон контактного трения — Кулона, коэффициент трения μ = 0,1. Скорость деформирования 5 мм/с.

Схема процесса асимметричной листовой прокатки показана на рис. 5. Прокатку осуществляли в валках одинакового диаметра за один проход без натяжений. При моделировании варьировали следующие параметры процесса: 1) начальная толщина заготовки h_0 = 8; 4; 2; 1 мм; 2) диаметры валков D = 50; 100; 200; 300; 400; 500 мм; 3) относительное обжатие за проход

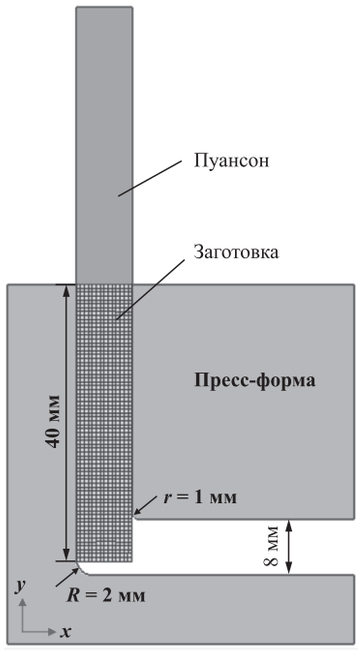


Рис. 4. Схема процесса РКУП

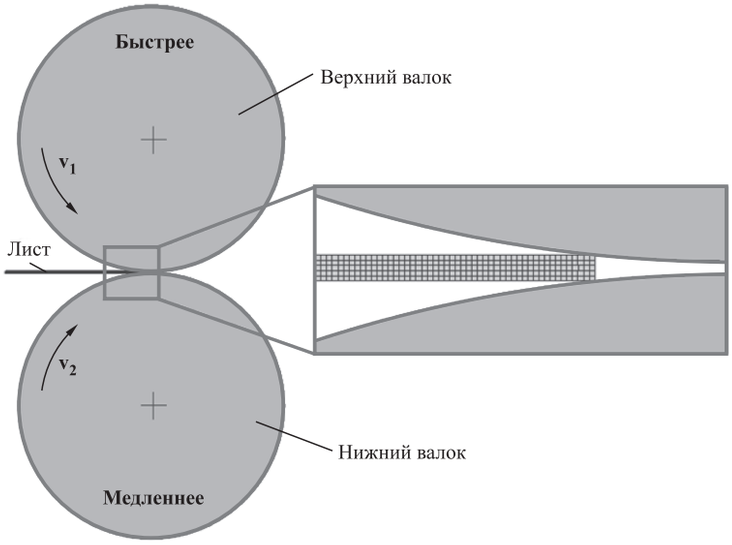


Рис. 5. Схема процесса асимметричной листовой прокатки

zp418.indd 177 05.04.2018 12:25:19

ε = 10; 20; 30; 40; 50; 60 %; 4) коэффициент трения μ = 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40 (закон Кулона); 5) окружная скорость верхнего валка v_1 = const 5 мм/с, окружную скорость нижнего валка v_2 снижали на 1...60 % (с шагом 1 %).

Во всех вариантах расчета материал заготовки — алюминиевый сплав АМг6 (аналог 5083) из базы материалов DEFORM-2D. Деформируемая среда — вязкопластическая. Пресс-форма, пуансон, валки — недеформируемые. Температура заготовки 200 °С, условия процессов — изотермические. Деформационный разогрев и теплообмен с окружающей средой не учитывали. Конечные элементы — четырехузловые, число элементов 1000...1200.

Зависимость предела текучести материала от размера зерен подчиняется хорошо известному соотношению Холла—Петча. В работе [7] показано, что в широком диапазоне размеров зерен микротвердость также удовлетворяет этому соотношению. В этой связи было рассмотрено влияние истинной деформации и способа обработки на микротвердость алюминиевого сплава АМг6.

Экспериментальное исследование микротвердости сплава АМг6 после деформации при температуре (200 ± 5) °С по схеме совмещенного простого и чистого сдвига, соответствующего асимметричной прокатке, проводили в соответствии с методикой, подробно изложенной в работах [8, 9]. Полученные результаты сравнивали с данными работы [10], в которой сплав АМг6 подвергали четырем проходам ортогонального РКУП при температуре (200 ± 2) °С.

Микротвердость HV определяли на твердомере Buchler Micromet методом вдавливания алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° согласно ГОСТ 9450 при нагрузке 0,981 Н (100 гс) и длительности нагружения 10 с.

Подготовку образцов проводили по стандартной методике с использованием шлифовки и полировки до зеркальной бездефектной поверхности (Rz = 0,1 мкм; Ra = 0,025 мкм).

Результаты моделирования и их обсуждение. При равноканальном угловом прессовании неравномерность деформации наблюдается на концевых участках, а также в приповерхностных слоях, контактирующих с пресс-формой (рис. 6, см. обложку). В средней части заготовки деформация максимальная и при этом равномерная. Квадратная ячейка трансформируется в параллелограмм той же толщины. Угол сдвига $\varphi \approx 64°$ (см. рис. 6, *а*). В результате интенсивность деформации в материале составляет ≈1,15 (см. рис. 6, *б*). Это значение согласуется с результатом, полученным по известной аналитической формуле для расчета истинной деформации при простом сдвиге:

$$e = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\sqrt{3}}. \qquad (1)$$

В процессе РКУП благодаря поворотной деформации круг трансформируется в эллипс таким образом, что направление его осей непрерывно изменяется (рис. 7). Это обеспечивает немонотонность деформации.

При обычной листовой прокатке по схеме чистого сдвига истинную деформацию рассчитывают по формуле

$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_1}, \qquad (2)$$

где h_1 — конечная толщина листа.

Сравнительный анализ показал, что истинная деформация, накопленная в материале заготовки после одного прохода РКУП, соответствует условиям обычной листовой прокатки с относительным обжатием ε = 63 % (рис. 8, см. обложку).

Контактное трение при обычной прокатке оказывает влияние на возникновение небольшой неравномерности деформации по толщине листа. Однако в центральных слоях влияние трения отсутствует, и элементарная квадратная ячейка трансформируется в прямоугольник (см. рис. 8, *а*), а круг — в эллипс (рис. 9), оси которого не изменяют своего положения в пространстве, т.е. деформация по схеме чистого сдвига является монотонной. Поэтому независимо от условий контактного трения значение истинной деформации в центральных слоях материала заготовки, рассчитанное методом конечных элементов, полностью совпадает с расчетом по формуле (2).

При асимметричной листовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига истинную деформацию определяют по формуле

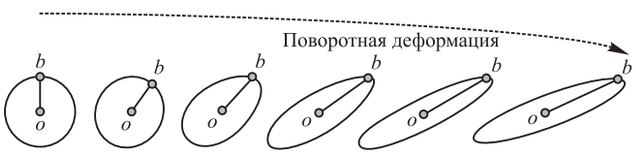


Рис. 7. Поворотная деформация в процессе РКУП по схеме простого сдвига

zp418.indd 178 05.04.2018 12:25:19

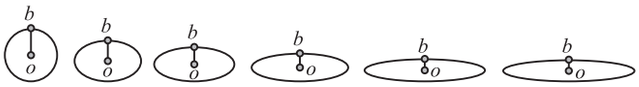


Рис. 9. Монотонная деформация при обычной листовой прокатке по схеме чистого сдвига

$$e = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\left(\ln\frac{h_0}{h_1}\right)^2 + \frac{\mathrm{tg}^2\,\varphi}{4}}. \qquad (3)$$

Если толщина заготовки при деформации не изменяется, т.е. $h_0 = h_1$, то формула (3) преобразуется в (1), и реализуется только простой сдвиг. Если угол $\varphi = 0$, то (3) преобразуется в (2), и реализуется только чистый сдвиг. Если угол сдвига $\varphi > 80°$, то истинная деформация, рассчитанная по формулам (1) и (3), является практически идентичной независимо от степени обжатия заготовки при асимметричной листовой прокатке.

Не все процессы асимметричной прокатки можно отнести к методам ИПД. Чтобы достичь больших деформаций, угол сдвига φ должен быть достаточно большим. Его значение зависит от технологических параметров процесса асимметричной прокатки.

Анализ полученных результатов расчета МКЭ показал, что максимальные значения истинной деформации в материале заготовки обеспечиваются при следующих условиях: уменьшение толщины исходной заготовки h_0 с 8,0 до 1,0 мм; увеличение диаметра валков D от 50 до 500 мм; повышение коэффициента контактного трения μ от 0,1 до 0,4. Это объясняется необходимостью создания высоких противоположно направленных сил трения, действующих в очаге деформации на контакте с верхним и нижним валками.

Влияние относительного обжатия ε и рассогласования скоростей валков Δv — более сложное. Каждому обжатию ε соответствует определенный уровень рассогласования скоростей валков Δv, обеспечивающий максимальное значение истинной деформации e в материале заготовки (рис. 10). Высокое трение является

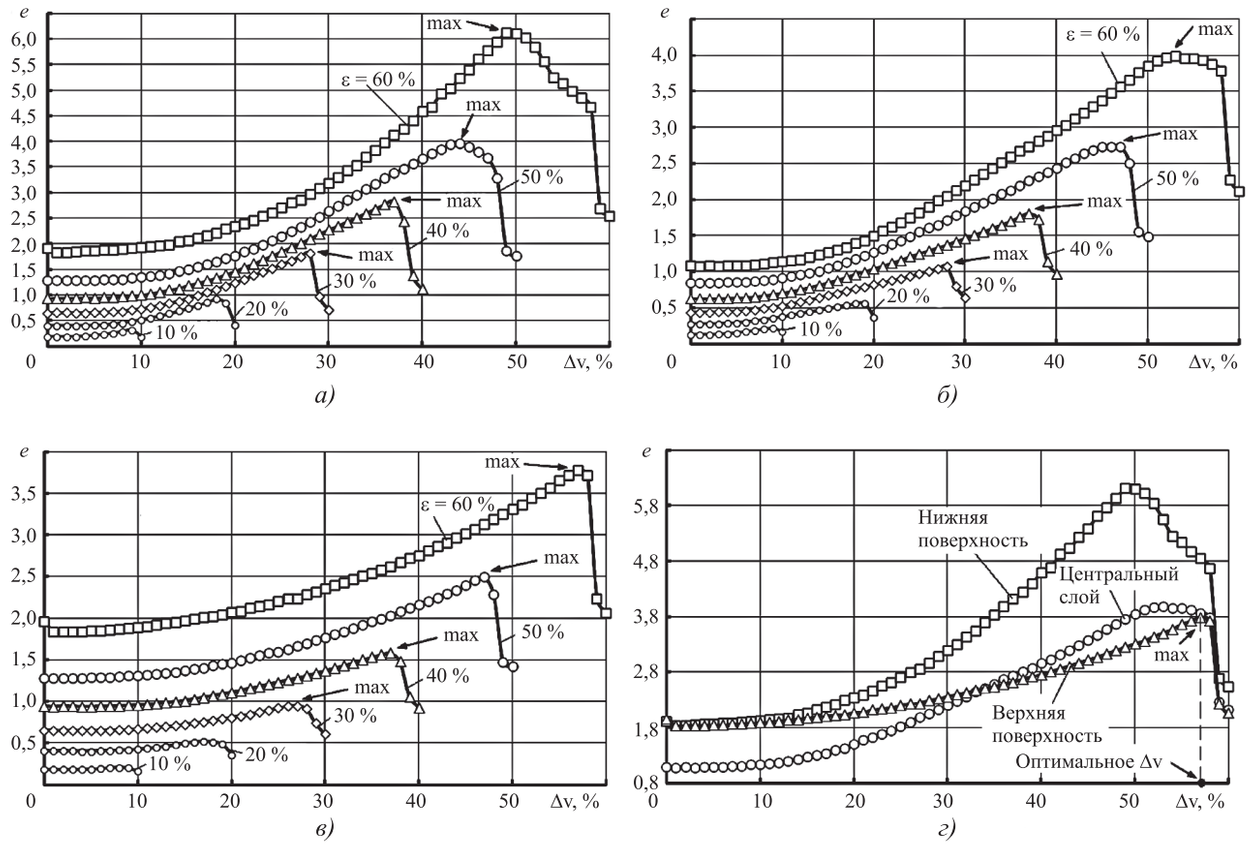


Рис. 10. Влияние относительного обжатия ε и рассогласования скоростей валков Δv на истинную деформацию e в нижнем (*а*), центральном (*б*) и верхнем (*в*) слоях материала листа при асимметричной прокатке (h_0 = 1 мм; D = 500 мм; μ = 0,4) и распределение истинных деформаций по толщине листа при ε = 60 % (*г*)

zp418.indd 179 05.04.2018 12:25:19

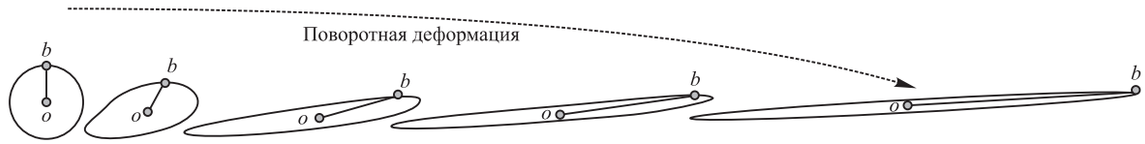


Рис. 12. Поворотная деформация при асимметричной листовой прокатке

причиной неравномерности деформации при асимметричной прокатке.

Деформация максимальна (см. рис. 10, *а*) на контакте с валком, вращающимся с меньшей скоростью (нижняя поверхность листа), и минимальна (см. рис. 10, *в*) на контакте с валком, вращающимся с большей скоростью (верхняя поверхность листа). Поэтому оптимальное Δv соответствует условиям, при которых обеспечивается максимальная деформация в верхнем слое материала листовой заготовки. Например, при асимметричной прокатке с обжатием 60 % оптимальное Δv = 57 % (см. рис. 10, *г*).

Сетка Лагранжа и поле интенсивности деформации для этого случая показаны на рис. 11 (см. обложку). Квадратная ячейка трансформируется в параллелограмм (рис. 11, *а*). Угол сдвига φ в центральном слое материала заготовки равен ≈81° и обеспечивает истинную деформацию e = 3,85, что согласуется с расчетом по формуле (3).

В результате поворотной деформации круг трансформируется в эллипс таким образом, что направление его осей непрерывно изменяется (рис. 12). Это обеспечивает немонотонность деформации при асимметричной листовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига.

Влияние угла сдвига на истинную деформацию в материале заготовки при обработке различными методами показано на рис. 13. При РКУП максимальный угол сдвига не превышает 64°. Ограничением является угол пересечения каналов, который не может быть меньше 90°. Поэтому за один проход истинная деформация в материале заготовки составляет ≈1,15. На практике для получения УМЗ-структуры методом РКУП требуется, как правило, не менее трех-четырех проходов. При асимметричной листовой прокатке с обжатием 60 % при оптимальных параметрах процесса угол сдвига превышает 80°, а истинная деформация за один проход составляет 3,8...4,8 по толщине листа.

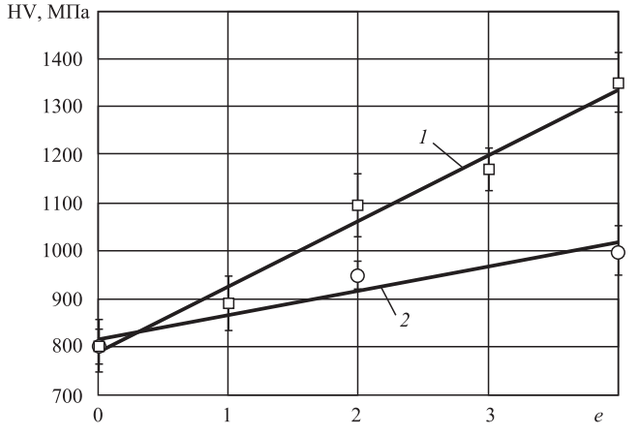


Рис. 14. Влияние истинной деформации *e* и способа обработки на микротвердость HV алюминиевого сплава АМг6:

1 — совмещенный простой и чистый сдвиг; *2* — РКУП по схеме простого сдвига

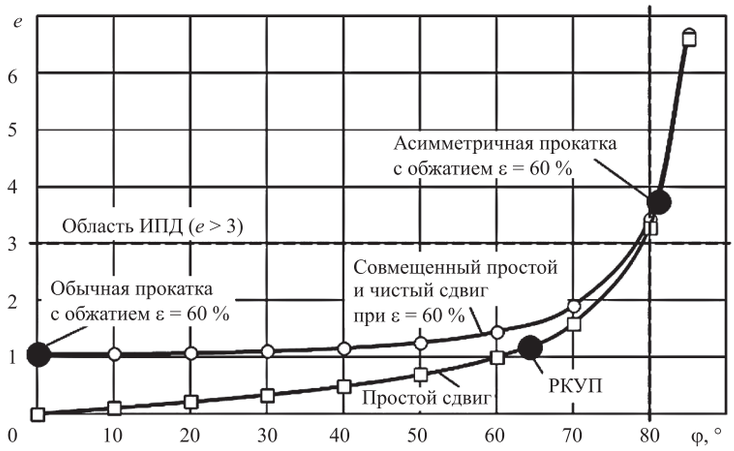


Рис. 13. Влияние угла сдвига φ на истинную деформацию *e* в материале заготовки при обработке различными методами

При теплой (≈200 °С) деформации сплава АМг6 по схеме совмещенного простого и чистого сдвига, соответствующего асимметричной прокатке, повышение микротвердости является значительным. При e = 4 среднее значение микротвердости возрастает с ≈800 до ≈1350 МПа (рис. 14). Это существенно превосходит результаты эксперимента, полученные в работе [10], где после четырех проходов ортогонального РКУП при температуре (200 ± 2) °С увеличение микротвердости сплава АМг6 составля-

zp418.indd 180 05.04.2018 12:25:20

ло в среднем 25...30 %, а максимальная микротвердость в продольном направлении образца при $e = 4$ не превышала ≈1050 МПа. Относительное различие микротвердости после двух и четырех проходов РКУП не превышало 7 %.

Таким образом, повышение микротвердости экспериментально подтверждает, что ИПД обеспечивает повышение прочностных характеристик сплава АМг6. При этом схема совмещенного простого и чистого сдвига, включающая поворотную моду деформации, и реализуемая при асимметричной листовой прокатке, более эффективна в сравнении со схемой простого сдвига, реализуемой при РКУП. Данное утверждение справедливо для случаев асимметричной прокатки тонких листов и полос в режиме ИПД.

Выводы

1. При асимметричной листовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига поворотная мода деформации обеспечивает немонотонность течения металла, что является одним из ключевых признаков, позволяющих отнести данный способ обработки металлов давлением к методам ИПД.

2. При оптимальных параметрах процесса асимметричной листовой прокатки ($h_0 = 1$ мм; $\varepsilon = 60$ %; $D = 500$ мм; $\Delta v = 57$ %; $\mu = 0{,}4$) истинная деформация за один проход составляет 3,8...4,8 по толщине листа, что соответствует трем-четырем проходам РКУП. С практической точки зрения для получения указанных деформационных характеристик необходимо применение прокатного оборудования с возможностью создания "большого" рассогласования (50...60 % и выше) окружных скоростей рабочих валков, при этом для создания высокого противонаправленного контактного трения прокатку необходимо проводить на сухих валках с параметром шероховатости Ra = = 3...9 мкм без использования технологической смазки при соотношении D/h не менее 400 (где D — диаметр, одинаковый для двух валков; h — толщина полосы до прокатки).

3. При деформации сплава АМг6 (при температуре ≈200 °С) по схеме совмещенного простого и чистого сдвига, соответствующего асимметричной прокатке с истинной деформацией $e = 4$, средняя микротвердость возрастает от ≈800 до ≈1350 МПа, что существенно выше, чем после четырех проходов РКУП по схеме простого сдвига, где максимальная микротвердость сплава АМг6 не превышает ≈1050 МПа.

4. Способ асимметричной прокатки имеет потенциал практического применения в заготовительном производстве в качестве метода ИПД тонких металлических листов и полос из различных металлов и сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Утяшев Ф.З., Рааб Г.И.** Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Уфа: Гилем, 2013. 375 с.
2. **Рааб Г.И.** Перспективы использования методов ИПД для получения высокопрочных металлических материалов в промышленных масштабах // Сб. материалов IV междунар. конф. "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов". М.: ИМЕТ РАН, 2011. С. 205—206.
3. **Бейгельзимер Я.Е.** Простой сдвиг металлов: что это такое? // Физика и техника высоких давлений. 2010. Т. 20. № 4. С. 40—52.
4. **Ji Y.H., Park J.J.** Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes // Materials Science and Engineering: 2009. Vol. 499. P. 14—17.
5. **Yu H., Lu C., Tieu K. et al.** Special Rolling Techniques for Improvement of Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Metal Sheets: A Review // Advanced Engineering Materials. 2015. P. 1—16.
6. **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.
7. **Гимазов А.А.** Влияние энергии дефекта упаковки на структуру и микротвердость чистых ГЦК металлов, полученных комбинацией методов интенсивной пластической деформации: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Уфа. 2014. 118 с.
8. **Pesin A.M., Pustovoytov D.O.** FE Analysis of the Applicability of the Shear-Compression Testing to the Modeling of the Asymmetric Rolling Process // Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 226—233.
9. **Physical** and computer simulation of severe plastic deformations on shear-compression testing of AMg6 (АМг6) aluminium alloy / A.M. Pesin, D.O. Pustovoytov, V.L. Steblyanko, S.A. Fedoseev // Non-ferrous Metals. 2017. No. 1. P. 17—21.
10. **Механические** свойства алюминий-магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации / А.А. Козулин, В.А. Красновейкин, В.В. Скрипняк, Б.В. Хандаев, Ю.В. Ли // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=11300 (дата обращения: 06.11.2017).

Александр Моисеевич Песин, д-р техн. наук,
pesin@bk.ru;
Денис Олегович Пустовойтов, канд. техн. наук;
Сергей Александрович Губанов;
Артем Эдуардович Новоселов

zp418.indd 181 05.04.2018 12:25:20

УДК 621.762.2 + 536.46

Ю.В. Титова, Д.А. Майдан, Д.Р. Сафаева
(Самарский государственный технический университет)

Развитие азидной технологии СВС нанопорошка SiC

Проведен анализ способов получения карбида кремния SiC. Исследована возможность увеличения чистоты и выхода нанопорошка SiC с использованием промежуточного синтеза нитрида кремния по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Получен порошкообразный продукт, состоящий из SiC (≈ 90 %) с примесью Si_3N_4 и Si (около 5 % каждого), представляющий собой наночастицы (80...150 нм), объединенные в агломераты размером до 50 мкм.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез; азид натрия; горение; нанопорошок; карбид кремния; нитрид кремния.

The analysis of methods for obtaining of silicon carbide SiC is performed. The possibility of increasing of purity and yield of the SiC nanopowder using intermediate synthesis of silicon nitride by azide technology of self-propagating high-temperature synthesis is studied. Powdery product is obtained, consisting from SiC (about 90 %) with admixture of Si_3N_4 and Si (about 5 % each), and representing nanoparticles (80...150 nm) combined into agglomerates with the size up to 50 μm.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis; sodium azide; combustion; nanopowder; silicon carbide; silicon nitride.

Введение. Керамика на основе высокодисперсного карбида кремния SiC обладает большим потенциалом для широкого применения в качестве конструкционного материала, носителей катализатора, теплообменников, фильтров для горячих газов, материала для высокотемпературных устройств. Известны различные способы получения карбида кремния. Основную часть SiC получают по методу Ачесона, основанному на восстановлении SiO_2 углеродом в электрических керновых печах сопротивления при 2200...2700 °С. Обычно продолжительность процесса составляет около 40 ч. Образующиеся поликристаллы дробят, рассеивают, а полученные порошки, состоящие из α-SiC, используют в основном в качестве абразивов, для изготовления электронагревателей, огнеупоров и частично конструкционной керамики. Метод Ачесона является простым и дешевым способом производства SiC, однако продукт оказывается некачественным по составу и структуре и требует дополнительной очистки [1].

Для получения нанопорошков применяют золь-гель способ, плазмохимические методы и высокотемпературный синтез.

Для приготовления нанопорошка SiC с использованием золь-гель метода [2] в отдельной емкости смешиваются вода и уксусная кислота, а в другой емкости с помощью магнитной мешалки в течение 30 мин при медленном нагреве до 40...50 °С перемешиваются этиловый спирт и тетраэтилортосиликат $SiC_8H_{20}O_4$. Затем растворы смешиваются и через 30 мин повторного перемешивания добавляется SiO_2 до формирования золя. Полученный золь перемешивают на горячей плите до получения геля. Далее гель высушивается при температуре 65 °С в течение суток для удаления остаточной воды и этанола, а затем измельчается до получения аморфного порошка карбида кремния. Для синтеза нанопорошка SiC по завершению процесса сушки образцы растираются в порошок и отжигаются в печи при температуре 500...900 °С в атмосфере воздуха с температурным градиентом 5 °С/мин.

zp418.indd 182 05.04.2018 12:25:20

В работе [3] для синтеза SiC предложен плазмодинамический способ. В канал формирования плазменной структуры вводится смесь кремния и углерода в виде сажи, которая при подведении к центральному электроду и электроду-стволу разности потенциалов от емкостного накопителя энергии переходит в плазменное состояние. Плазменный поток ускоряется и движется со скоростью, сравнимой со скоростью звука, в камеру-реактор, где происходит формирование экстремальных энергетических условий (давления и температуры), способствующих прохождению химической реакции соединения кремния и углерода и получения карбида кремния. Выявлено, что в состав продукта входят следующие кристаллические фазы: карбид кремния β-SiC, кубический кремний Si, а также сочетание как минимум двух углеродных фаз: графита и луковичной структуры. При этом все фазы в продукте нанодисперсны, судя по значениям областей когерентного рассеяния.

В [4] развит способ карботермического восстановления сферических частиц аморфного диоксида кремния и получены нанокристаллы гексагональных политипов α-SiC. В зависимости от диаметра исходных частиц диоксида кремния получены нанокристаллы гексагонального карбида кремния размером 5...50 нм.

Однако указанные методы не позволяют синтезировать продукт в достаточном количестве, необходимой дисперсности и структуры при малых энергозатратах и простоте процесса синтеза.

Метод *самораспространяющегося высокотемпературного синтеза* (СВС) тугоплавких соединений не имеет таких недостатков. Для него характерны низкие затраты электроэнергии, малая продолжительность процесса, высокая чистота продуктов, возможность получения новых соединений, особенно многофазных композитов, которые трудно синтезировать с использованием других методов, широкие возможности регулирования дисперсной структуры порошков: от монокристальных зерен до наноразмерных частиц [5].

Однако проблема состоит в том, что реакция прямого синтеза карбида кремния из элементов

$$Si + C = SiC + 73 \text{ кДж/моль} \qquad (1)$$

обладает недостаточно высокой экзотермичностью и сравнительно низкой адиабатической температурой горения (1173 K), вследствие чего в этой бинарной системе не удается осуществить самоподдерживающийся процесс горения [6]. Поэтому для синтеза SiC в режиме СВС применяют различные виды "активации" процесса [7], среди которых можно выделить предварительный подогрев исходной смеси, добавление химических активаторов или длительное перемешивание исходных компонентов с последующим синтезом в среде азота или воздуха.

Авторами [6] впервые был осуществлен прямой синтез субмикронного нанокристаллического порошка SiC из элементов в режиме горения в инертной атмосфере с использованием предварительной кратковременной высокоэнергетической обработки исходной реакционной смеси порошков кремния и углерода в планетарной мельнице. Установлено существование критической длительности высокоэнергетической механической обработки. Если время обработки меньше 15 мин, то образцы из полученной смеси не горели. Образцы, обработанные в течение 15 мин, удавалось зажечь при комнатной температуре в среде аргона и получить стационарный режим горения. При этом максимальная температура горения составляла (1750 ± 50) K.

Также было определено, что скорость и режим горения механически активированных смесей зависят от давления инертного газа. При увеличении давления газа скорость горения повышается, при этом пульсирующий (автоколебательный) режим горения переходит в стационарный. При дальнейшем увеличении времени механического воздействия на реакционную смесь скорость и температура горения постепенно снижались, горение переходило в автоколебательный режим, а при длительности обработки 60 мин и более образцы не удавалось зажечь. Это связано с постепенным образованием продукта реакции SiC уже на стадии механической обработки. Размер частиц синтезированного карбида кремния 50...300 нм.

В работе [8] способ СВС применен для синтеза высокодисперсного порошка SiC и композиции порошков на его основе Si_3N_4—SiC сжиганием в атмосфере азота исходной смеси порошков кремния и углерода. Использован промежуточный синтез нитрида кремния, при котором выделяется большое количество

zp418.indd 183 05.04.2018 12:25:20

теплоты и создается температура, достаточная для того, чтобы получившийся Si_3N_4, вступая в реакцию с углеродом, образовывал SiC:

$$(3x + y)Si + yC + 2xN_2 = xSi_3N_4 + ySiC. \quad (2)$$

Соотношение C/Si составляло 10; 20; 30 и 40,5 % об., при этом продукт содержал 36,8; 63,2; 83,3 и 100 % SiC соответственно после протекания СВС реакции. Фильтрационное горение проводили в реакторе высокого давления под давлением азота 3 МПа. Синтез нанопорошка SiC осуществляется в три этапа: азотирование поверхности кремния на начальных этапах; одновременное азотирование и карбидизация жидкого кремния; карботермическое восстановление образовавшегося нитрида кремния.

Установлено, что при фильтрационном горении системы Si—C—N азотирование кремния является основной реакцией, которая управляет самораспространением фронта горения. Эта реакция создает так называемую “химическую печь”, теплоотдача от которой в процессе горения позволяет преодолеть активационный барьер менее экзотермической реакции синтеза карбида кремния. При синтезе была получена смесь очень мелких частиц продукта с достаточно крупными.

Другой способ получения карбида кремния по технологии СВС, основанный на применении активных добавок, изменяющих механизм взаимодействия исходных компонентов, предложен в работе [9]. Для получения чистого карбида кремния и композита Si_3N_4/SiC, содержащего большое количество карбида кремния, использовали системы Si—(mC—$n(C_2F_4)_n$) и Si—(0,9C—0,05$(C_2F_4)_n$), в которых массовая доля фторопласта составляла 5...15 % с учетом того, что в этом случае углерод фторопласта является карбидизирующим агентом.

Процесс образования карбида кремния и композиции карбид кремния/нитрид кремния можно представить согласно схеме:

$$(y + x)Si_s + (1 - 2x)C_s + x(C_2F_4)_{n(s)} = \\ = xSiF_{4(g)} + C_s + ySi_{s,\,l}; \quad (3)$$

$$Si_{s,\,l} + Cs = SiC_s; \quad (4)$$

$$3Si_{s,\,l} + 2N_2 = Si_3N_{4(s)}, \quad (5)$$

где нижние индексы s, g, l — агрегатные состояния веществ: s — твердое тело; g — газ; l — жидкость.

Таким образом, применение фторопласта в качестве активирующей добавки дает возможность в одностадийном режиме получить композит Si_3N_4/SiC с широким диапазоном содержания индивидуальных компонентов (от 0 до 100 %).

С 1970 г. в СамГТУ разрабатывается азидная технология СВС позволяющая получать микро- и нанопорошки нитридов и композиций на их основе при использовании порошка азида натрия NaN_3 в качестве азотирующего реагента и галоидных солей [10].

Ранее [11] для увеличения вероятности появления карбида кремния в продуктах реакции, повышения энергетики смесей и уменьшения количества азида натрия авторами статьи было предложено следующее уравнение получения SiC с использованием энергетической добавки алюминия:

$$14Si + 3NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 15C + Al = \\ = 15SiC + Na_3AlF_6 + 5N_2 + 4H_2. \quad (6)$$

В результате горения смеси состава Si—NaN_3—$(NH_4)_2SiF_6$—C—Al удалось получить композицию на основе нанопорошка карбида кремния по азидной технологии СВС. Количественное соотношение фаз в продукте: 48,6 % β-SiC; 27,0 % α-Si_3N_4; 5,8 % β-Si_3N_4; 18,6 % Na_3AlF_6. Размер частиц карбида кремния 50...150 нм, а диаметр нитевидных кристаллов нитрида кремния 100 нм.

Цель работы — исследование процесса и разработка технологии получения нанопорошка карбида кремния по азидной технологии СВС без применения различных видов "активации" процесса.

Методика проведения исследований. Известен состав смеси 19Si + 6NaN_3 + $(NH_4)_2SiF_6$ + 5C, позволяющий синтезировать композицию 50 % SiC — 50 % Si_3N_4 [10]. Для получения чистого карбида кремния количество углерода в исходной шихте увеличено до 20 моль. Уравнения получения карбида кремния:

$$19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 5C = \\ = 5Si_3N_4 + 5SiC + 6NaF + 4H_2; \quad (7)$$

$$19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 8C = \\ = 4Si_3N_4 + 8SiC + 6NaF + 4H_2 + 2N_2; \quad (8)$$

$$19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 11C = \\ = 3Si_3N_4 + 11SiC + 6NaF + 4H_2 + 4N_2; \quad (9)$$

zp418.indd 184 05.04.2018 12:25:20

$$19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 14C = \\ = 2Si_3N_4 + 14SiC + 6NaF + 4H_2 + 6N_2; \quad (10)$$

$$19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 17C = \\ = Si_3N_4 + 17SiC + 6NaF + 4H_2 + 8N_2; \quad (11)$$

$$19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 20C = \\ = 20SiC + 6NaF + 4H_2 + 10N_2. \quad (12)$$

Количество углерода 20 моль является стехиометрическим. Можно предположить, что при этом значении весь имеющийся кремний связывается в карбид (SiC), при этом нитрид (Si_3N_4) не образуется.

В качестве исходного сырья использовали: порошок кремния КР0 (⩾98,8 % мас. Si), порошок азида натрия классификации "Ч" (⩾ 98,71 % мас. NaN_3), порошок гексафторсиликата аммония классификации "Ч" (⩾98,97 % мас. $(NH_4)_2SiF_6$), технический углерод марки П701 (⩾88 % мас. С). Методика проведения экспериментальных исследований в реакторе СВС постоянного давления объемом 4,5 л описана в работе [10]. Сжигали цилиндрические образцы (диаметром 30 мм, высотой 45 мм) исходной смеси порошков насыпной плотности.

Для предварительного анализа температуры горения смеси исходных компонентов и состава продуктов синтеза выполняли термодинамические расчеты с помощью программы "Thermo", разработанной в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черноголовка, Московская обл.).

Исследовали химический и фазовый составы, морфологию и размер частиц продуктов горения. Фазовый состав определяли на автоматизированном рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA фирмы Termo Scientisic. Съемку рентгеновских спектров проводили с помощью Cu-излучения при непрерывном сканировании в интервале углов 2θ = 20...80° со скоростью 2°/мин. Полученные спектры обрабатывали с использованием специального пакета прикладных программ WinXRD.

Количественный фазовый анализ осуществляли методом полнопрофильного анализа с помощью программы PDXL 1.8.1.0 с использованием открытой кристаллографической базы данных (COD). Морфологию частиц порошка исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6390A фирмы Jeol с приставкой Jeol JED-2200.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В табл. 1 приведены результаты термодинамических расчетов: адиабатическая температура горения, изменение энтальпии системы в реакции и состав продуктов синтеза при различном количестве углерода в исходной смеси.

Получено, что при увеличении количества углерода в исходной смеси значительно уменьшается адиабатическая температура реакции, а также снижается тепловой эффект реакции. При количестве углерода от 5 моль продукты реакции предположительно будут содержать SiC, Si_3N_4, NaF и H_2. При увеличении количества углерода до 20 моль продукты синтеза представляют собой целевой SiC, NaF и газообразные N_2 и H_2. Полученные результаты термодинамического анализа полностью согласуются с уравнениями (7)—(12).

Из анализа результатов термодинамических расчетов следует, что смесь $19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 20C$ является оптимальной для синтеза SiC, так как в результате горения этой смеси образуются целевой SiC и побочные продукты — N_2, H_2 и NaF, которые легко удаляются и не загрязняют конечный продукт. Адиабатическая температура горения и изменение энтальпии системы в реакции достаточны для образования SiC в процессе азидной технологии СВС.

1. Результаты термодинамических расчетов параметров горения и состава продуктов синтеза

Количество углерода в исходной смеси, моль	Адиабатическая температура, К	Количество, моль					Энтальпия, кДж
		SiC	Si_3N_4	NaF	H_2	N_2	
5	3345	5	5	6	4	—	−4941
8	2951	8	4	6	4	2	−4380
11	2918	11	3	6	4	4	−3765
14	2815	14	2	6	4	6	−3258
17	2689	17	1	6	4	8	−2697
20	2505	20	-	6	4	10	−2136

zp418.indd 185 05.04.2018 12:25:20

2. Параметры горения смеси $19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + xC$

Количество углерода в исходной смеси, *x*, моль	Температура горения, °С	Скорость горения, см/с	Теоретический/практический выход SiC, г
5	2992	0,35	3,94/0,33
8	2618	0,33	6,13/0,67
11	2575	0,29	8,20/4,10
14	2492	0,23	10,16/6,60
17	2346	0,20	12,02/8,53
20	2162	0,18	13,78/12,40

3. Соотношение фаз в промытых продуктах горения

Количество углерода в исходной смеси, моль	Состав продуктов горения, %				
	β-SiC	α-Si_3N_4	β-Si_3N_4	Si	SiO_2
5	8,40	66,56	23,80	0	1,24
8	10,80	62,10	26,00	1,10	0
11	50,30	27,40	21,40	0,90	0
14	64,70	19,50	14,00	1,80	0
17	70,70	24,70	4,60	0	0
20	89,40	5,50	0	5,10	0

Результаты экспериментального определения температуры и скорости горения представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что с увеличением количества углерода *x* в исходной смеси снижаются температура и скорость горения, что согласуется с результатами термодинамических расчетов. Эспериментальные значения температуры горения ниже теоретических. Это связано с тем, что, как показывают результаты рентгенофазового анализа, состав продуктов реального процесса горения отличается от расчетного. Также теплота горения частично расходуется на нагрев окружающей среды.

На рис. 1 приведены результаты рентгенофазового анализа продуктов химических реакций (7), (9) и (12).

При горении смесей с количеством углерода до 17 моль образуются четыре фазы: β-SiC, α-Si_3N_4, β-Si_3N_4 и NaF. Фторид натрия благодаря хорошей растворимости полностью удаляется в результате промывки в дистиллированной воде. При дальнейшем увеличении количества углерода в продуктах реакции появляется свободный кремний.

Установлено, что увеличение количества углерода в исходной смеси приводит к изменению соотношения фаз в продуктах горения (табл. 3). Наряду с целевым продуктом карбидом кремния, продукты горения содержат также побочные соединения — нитрид кремния и свободный кремний. Максимальный выход карбида кремния наблюдается при горении смеси $19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + 20C$.

На рис. 2 показана морфология частиц порошков, синтезированных из смеси $19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + xC$.

С учетом результатов рентгенофазового анализа порошков можно сделать вывод о том, что на рис. 2, *а* и *б* видна типичная для нитрида кремния форма столбчатых кристаллов диаметром от 100 до 200 нм. Карбид

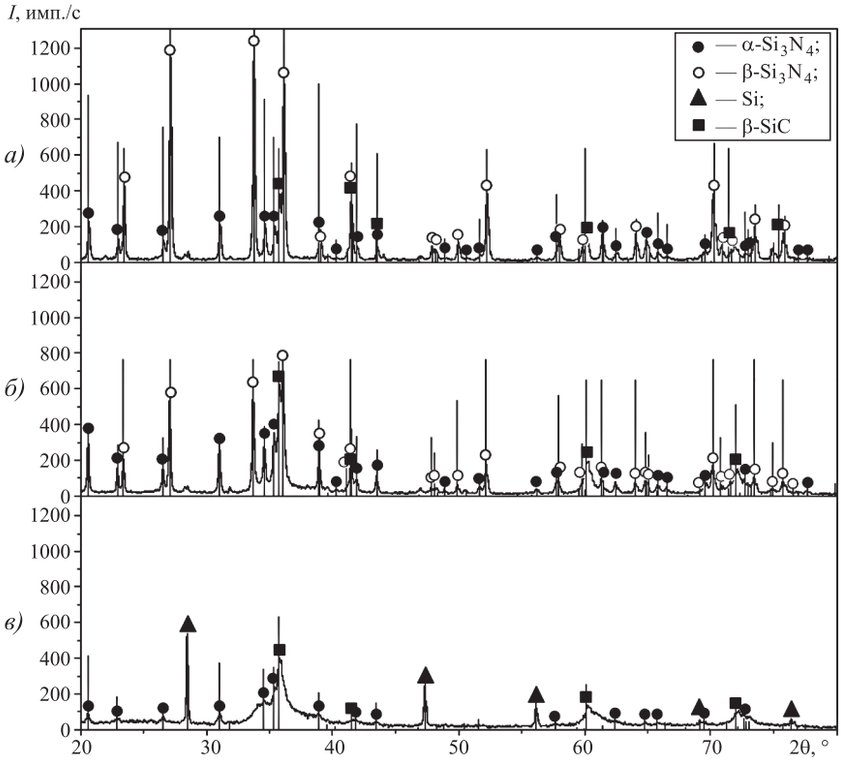


Рис. 1. Рентгенограммы промытых продуктов, синтезированных из смеси $19Si + 6NaN_3 + (NH_4)_2SiF_6 + xC$ при различном количестве углерода:
а — 5 моль; *б* — 11 моль; *в* — 20 моль

zp418.indd 186 05.04.2018 12:25:20

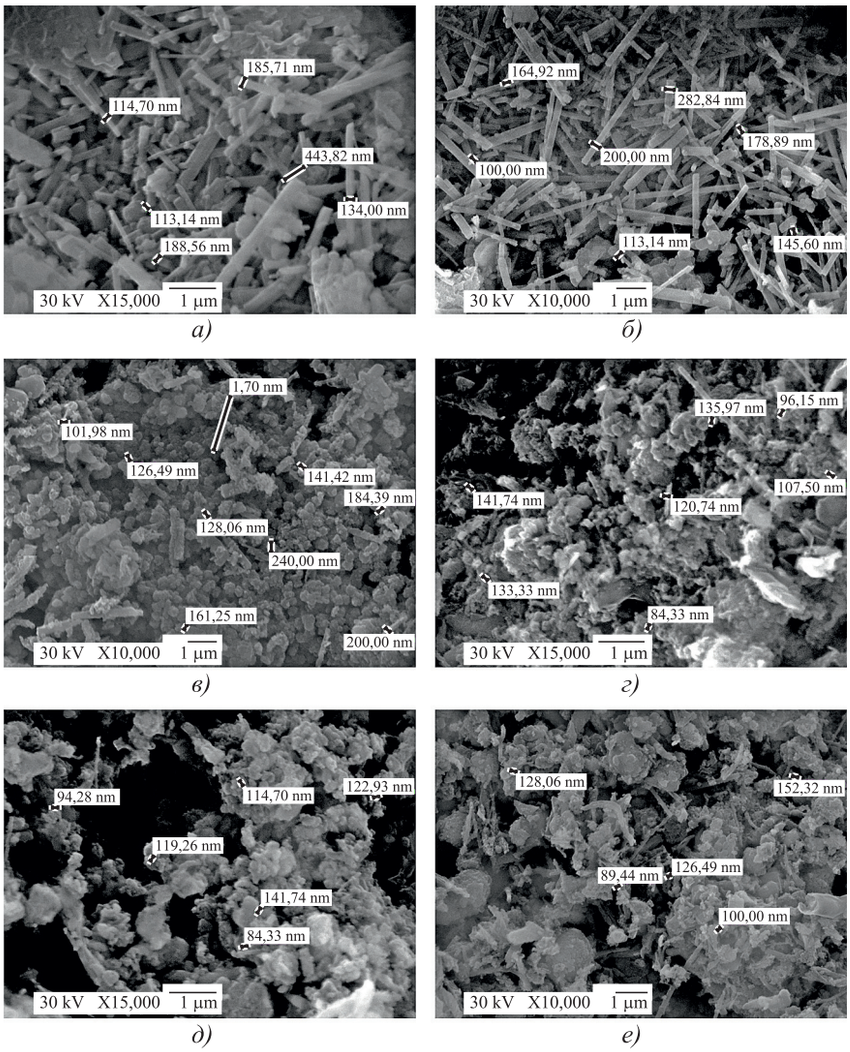


Рис. 2. Морфология частиц продуктов горения смесей 19Si + 6NaN_3 + + $(NH_4)_2SiF_6$ + *x*C при различном количестве углерода:
а — 5 моль; *б* — 8 моль; *в* — 11 моль; *г* — 14 моль; *д* — 17 моль; *е* — 20 моль

кремния синтезируется в виде равноосных частиц размером 80...150 нм, объединенных в агломераты размером до 50 мкм.

Заключение. Применение азидной технологии СВС позволило получить из смеси 19Si + + 6NaN_3 + $(NH_4)_2SiF_6$ + 20C продукт, состоящий из β-89,4 % SiC; 5,5 % α-Si_3N_4 и 5,1 % Si, представляющий собой наноразмерные частицы карбида кремния (80...150 нм), объединенных в агломераты размером до 50 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лучинин В., Таиров Ю.** Карбид кремния — алмазоподобный материал с управляемыми наноструктурно-зависимыми свойствами // Наноиндустрия. 2010. Вып. 1. С. 36—39.

2. **Затиростами А., Муминов Х.Х., Холов А.** Синтез нанопорошка карбида кремния методом золь-гель и его структурный анализ // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. № 4. С. 286—289.

3. **Никитин Д.С., Сивков А.А.** Плазмодинамический синтез карбида кремния и управление составом продукта // Современные техника и технологии: сб. докладов XX Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 2. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2014. С. 71—72.

4. **Жохов А.А., Масалов В.М., Матвеев Д.В.** и др. Синтез нанокристаллов α-SiC при карботермическом восстановлении сферических наночастиц аморфного диоксида кремния // Физика твердого тела. 2009. Т. 51. Вып. 8. С. 1626—1631.

5. **Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А Г.** Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учеб. пособие / под науч. ред. В.Н. Анциферова. М.: Машиностроение, 2007. 567 с.

6. **Московских Д.О., Мукасьян А.С., Рогачев А.С.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез нанопорошков карбида кремния // ДАН. 2013. Т. 449. № 2. С. 176—179.

7. **Mukasyan A.S.** Combustion Synthesis of Silicon Carbide // N.Y.: InTech. 2011. P. 389—409.

8. **Preparation** of fine powder in the Si—C—N system using SHS method [Text] / D. Kata, J. Lis, R. Pampuch, L. Stobierski // International Journal of Self-Propfgatibng High-Temperature Synthesis. 1998. № 4. Vol. 7. P. 475—485.

9. **Хачатрян Г.Л., Арутюнян А.Б., Харатян С.Л.** Активированное горение смеси кремний — углерод в азоте и СВС композиционных керамических порошков Si_3N_4/SiC и карбида кремния // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 5. С. 56—62.

10. **Бичуров Г.В., Шиганова Л.А., Титова Ю.В.** Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридных композиций. М.: Машиностроение, 2012. 519 с.

11. **Титова Ю.В., Амосов А.П., Ермошкин А.А. и др.** Получение нанопорошка карбида кремния и композиции на его основе по азидной технологии СВС // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 3. С. 43—48.

Юлия Владимировна Титова, канд. техн. наук,
titova600@mail.ru;
Дмитрий Александрович Майдан, канд. техн. наук;
Диана Радиковна Сафаева

zp418.indd 187 05.04.2018 12:25:20

УДК 621.73.043:621.77.014

Ю.К. Филиппов, И.С. Петухов, А.Н. Пономарев, А.В. Козлечков, С.М. Умаров
(Московский политехнический университет)

Художественная рельефная чеканка подарочных юбилейных медалей

Представлены особенности медалей при чеканке, в том числе с позиций анализа технологических возможностей сталей. Исследован процесс холодной объемной штамповки рельефа при чеканке медалей. Для моделирования использована конечно-элементная система QFORM. Изучено влияние толщины и диаметра заготовки из латуни Л68 для последующей чеканки медалей на силу штамповки и выбор пресса.

Ключевые слова: чеканка; медаль; моделирование; QFORM; штампы.

The peculiarities of the medals in the coinage, including from the standpoint of the analysis of technological possibilities of steel are presented. The cold forging process of relief at coinage of medals are studied. Finite element system QFORM is used for simulation. Effect of the thickness and diameter of the billet from L68 brass for the subsequent coinage of the medals on the forging force and the choice of the press is studied.

Keywords: coinage; medal; simulation; QFORM; stamps.

Среди произведений декоративно-прикладного искусства, которые были созданы в прошлом и создаются в наши дни, большое и почетное место занимают изделия из металла.

Медаль (фр. *medaille*) [1] — особый знак, как правило, металлический, с двусторонним изображением, выпускаемый в память о каком-либо событии, по случаю юбилейных дат и др.

Цель работы — анализ и разработка эффективной технологии производства памятной медали методом чеканки с применением моделирования в программе QFORM.

В современных условиях процесс создания художественного произведения из металла состоит из трех этапов, тесно связанных между собой:

I этап — проектирование будущего изделия, когда художник задумывает произведение, осмысливает его художественно-образное содержание, ищет наиболее выразительную художественную форму, исходя из его назначения, работает над композицией, цветом и т.п.

II этап — воплощение художественного замысла в металле, т.е. создание авторского образца с использованием различных приемов художественной обработки металла — чеканки, скани, гравирования и т.п.

III этап — тиражирование.

Технология чеканки накладывает жесткие ограничения на свойства используемых материалов. Чтобы надолго сохранить в образце мелкие детали изображения, материал должен быть прочным и пластичным одновременно. Металл для чеканных медалей должен обладать хорошими визуальными качествами, средней пластичностью и сравнительно высоким сопротивлением коррозии и износу в холодном состоянии.

Для изготовления медалей главным образом используют драгоценные металлы (золото, серебро), медь или сплавы на их основе (бронза, латуни Л62, 68, томпаки Л96, Л90, Л85, мельхиор НМ81, нейзильбер НМЦ65—20). Большинство латуней имеет красивый золотисто-желтый цвет. Художественные латунные изделия, покрытые специальными бесцветными или слабо окрашенными спиртовыми лаками или нитролаками, приобретают и надолго сохраняют вид и блеск золота. Латуни применяют для изготовления уникальных памятных и подарочных медалей с последующим серебрением или золочением [2—5].

Большинство латуней хорошо прокатывается, штампуется и чеканится. Латунь легко и

zp418.indd 188 05.04.2018 12:25:21

Рис. 1. Этапы изготовления памятной медали

прочно покрывается различными гальваническими покрытиями: никелем, серебром и золотом; хорошо принимает химические оксидировки и может быть тонирована в любые цвета [3].

Этапы изготовления памятной медали "Университет машиностроения 150 лет", изготовленной из латуни Л68, показаны на рис. 1.

При моделировании рассматривался процесс чеканки медали, показанных на рис. 1 и 2. Исходные данные для моделирования технологического процесса: материал заготовки — латунь Л68; коэффициент трения — 0,1; температура окружающей среды, штампового инструмента и заготовки — 20 °С. Технологическое оборудование — механический кривошипный пресс силой 4,0 МН.

Технология чеканки медали: вырубка, зачистка и чеканка.

Операции вырубки и зачистки заготовок осуществляли на кривошипно-шатунном прессе КД2126, а чеканку медали — на кривошипно-коленном прессе К8336 (рис. 3) [6].

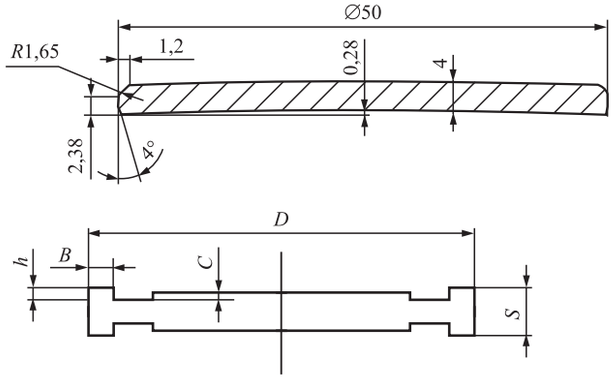


Рис. 3. Профиль вырубленной заготовки и чеканенной медали:

$D = 50_{-0,05}$ мм; $S = 4,0_{-0,03}$ мм; $B = 1,0_{-0,02}$ мм; $h = 0,7_{-0,02}$ мм; $C = 0,5_{-0,02}$ мм

Профиль вырубленной заготовки и чеканенной медали приведены на рис. 4

При проведении экспериментальных работ были выявлены основные виды и причины брака и способы и мероприятия их устранения (см. таблицу), а также получена зависимость силы вырубки заготовок из латуни Л68 в зависимости от толщины и диаметра заготовок (рис. 5).

На основании экспериментальных и расчетных данных построены графики при формообразовании медалей, получаемых штамповкой на механических прессах.

Графики позволяют выбрать для чеканки модель пресса для получения заготовок необходимых геометрических размеров с последующим формообразованием медалей требуемого

Рис. 2. Примеры медалей

zp418.indd 189 05.04.2018 12:25:21

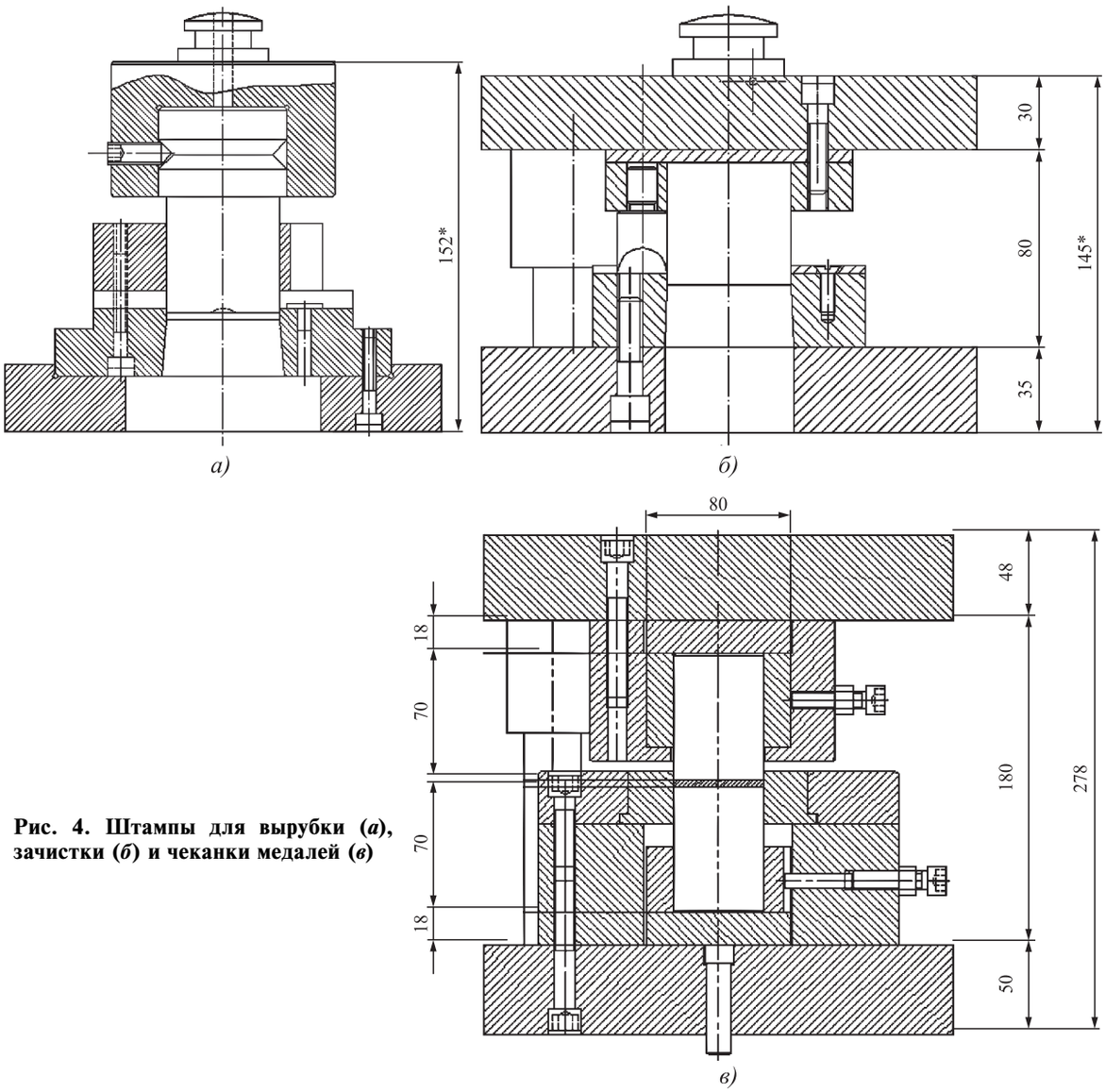


Рис. 4. Штампы для вырубки (*а*), зачистки (*б*) и чеканки медалей (*в*)

качества с получением рельефа и заполнения гравюры (рис. 5—7).

Критериями, определяющими выбор оптимального технологического процесса чеканки, являются технологические силы и деформации при формообразовании различных участков исследуемой медали без дефектов, жестко связанные с механически-

Основные виды брака изделий, полученных чеканкой

Вид брака	Причина брака
Трещины, раковины, царапины, вмятины	Несоблюдение технологии, низкое качество материала заготовки
Заусенцы, облой, шероховатость поверхности	Некачественная оснастка (штамп), завышенный зазор между пуансоном и матрицей
Нечеткость рисунка, формовки	Износ штампа, ошибка при выборе силы пресса
Обрыв контура деталей	Зазор между пуансоном и матрицей меньше допустимого
Смещение рисунка	Несоосность оснастки
Грязь на деталях	Не проведены предварительные очистка и промывка
Изгиб детали	Слишком большой зазор между пуансоном и матрицей
Нарушение формы и размеров детали	Неисправность штампа

zp418.indd 190 05.04.2018 12:25:21

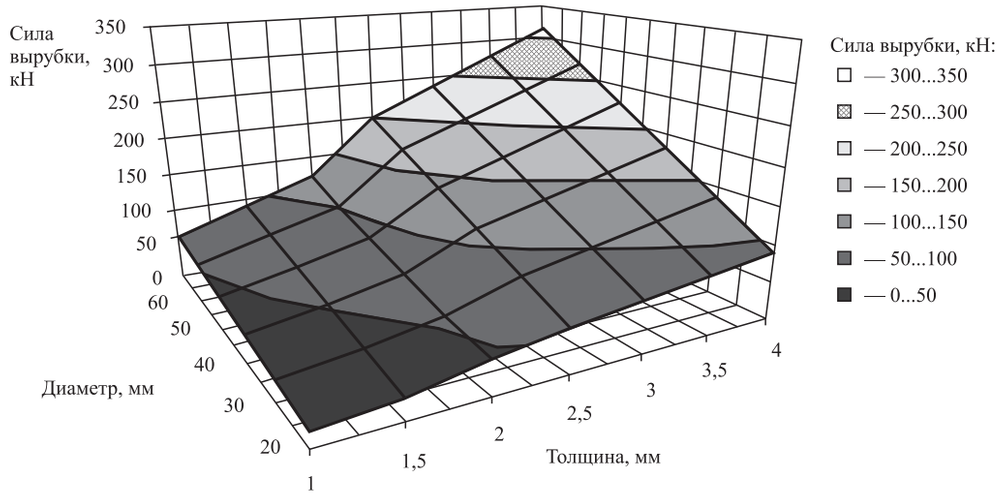


Рис. 5. Сила вырубки заготовок из латуни Л68 в зависимости от толщины и диаметра заготовки

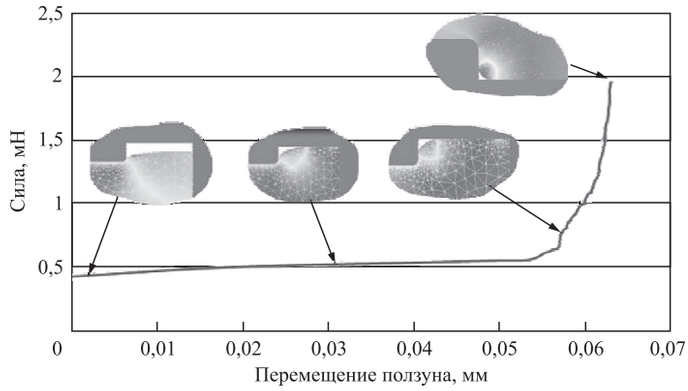


Рис. 6. Заполнение гурта 0,3 мм в зависимости от силы и перемещения ползуна

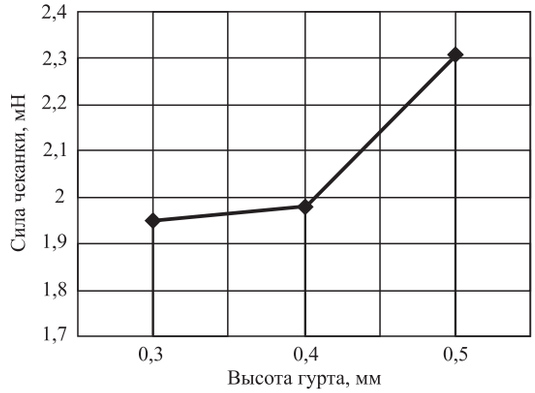


Рис. 7. Зависимость силы чеканки от высоты гурта

ми характеристиками применяемого материала.

Заключение. Систематизированы и обобщены результаты новых исследований при формообразовании гравюры медали без дефектов с определением энергосиловых характеристик, а также представлены образцы чеканки изделий.

Даны рекомендации по выбору необходимого оборудования для получения медалей требуемых геометрических размеров (диаметр и толщина) и качества для заполнения гравюры при чеканке.

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре "Обработка материалов давлением и аддитивные технологии" Московского политехнического университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Листовая** штамповка. Расчет технологических параметров: справочник / под ред. В.И. Ершова, А.С. Чудина. М.: МАИ, 1999. 513 с.

2. **Филиппов Ю.К., Белоусов В.Б.** Холодное выдавливание инструмента для рельефной чеканки // Заготовительные производства в машиностроении. 2004. № 12. С. 16—19.

3. **Флёров А.В.** Материаловедение и технология художественной обработки металлов: учебник. М.: Высшая школа, 1981. 288 с.

4. **Филиппов Ю.К., Типалин С.А., Крутина Е.В.** Металлы и сплавы для художественной чеканки. М.: МАМИ, 2013. 29 с.

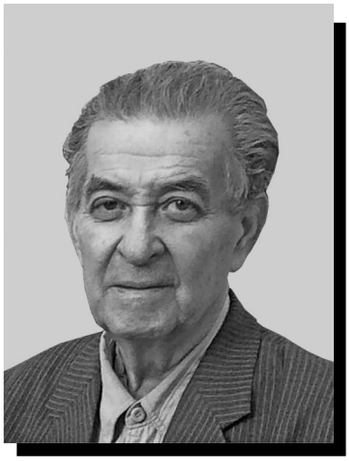
5. **Художественная** чеканка медалей / Ю.К. Филиппов, С.А. Типалин, С.С. Яковлев, Н.Е. Проскуряков. Тула: ТулГУ, 2014. 52 с.

6. **Ковка** и штамповка: справочник. В 4 т. / под общ. ред. Е.И. Семенова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. 2521 с.

Юлиан Кириллович Филиппов, д-р техн. наук,
yulianf@mail.ru;
Иван Сергеевич Петухов;
Андрей Николаевич Пономарев;
Александр Владимирович Козлечков;
Сергей Маратович Умаров

zp418.indd 191 05.04.2018 12:25:21

Памяти
Льва Соломоновича Кохана
(14.12.1935—18.03.2018)



18 марта 2018 года на 83-м году жизни скончался выдающийся ученый в области теории и технологии обработки металлов давлением и металлургического оборудования, заслуженный металлург и изобретатель Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры "Обработка материалов давлением и аддитивные технологии" Московского политехнического университета Лев Соломонович Кохан.

Л.С. Кохан родился 14 декабря 1935 г. в Москве в рабочей семье. В 1958 г. с отличием окончил Московский автомеханический институт (МАМИ). Далее в течение двух лет служил в рядах Советской армии.

С 1960 по 1965 г. работал на закрытом авиационном заводе "Кристалл". В 1963 г. поступил в аспирантуру МАМИ на кафедру теоретической механики. В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Совершенствование конструкции метизных автоматов".

С 1966 по 2012 г. работал в Московском государственном вечернем металлургическом институте (МГВМИ) в должностях доцента, профессора, заведующего кафедрой.

В 1994 г. защитил докторскую диссертацию на тему "Теория и технология производства крепежных изделий высокоскоростным деформированием".

С 1995 до 2012 г. работал в должности профессора кафедры "Металловедение и обработка металлов давлением" в МГВМИ, с 2013 г. — профессором на кафедре "Машины и технология обработки металлов давлением" МГТУ "МАМИ" (ныне кафедра "Обработка материалов давлением и аддитивные технологии" Московского политехнического университета).

Научная деятельность Льва Соломоновича была связана с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов обработки металлов давлением. Им были предложены оригинальные расчетные методики определения конечной геометрии изделия в операциях листовой штамповки и волочении, установлена кинематика очага деформации и силовые параметры продольной листовой прокатки, проведены исследования технологии штамповки композиционных материалов из металлических порошков.

Л.С. Кохан — автор более 500 научных трудов, 30 авторских свидетельств на изобретения, более 30 монографий и более 10 учебников: "Механическое оборудование заводов черной металлургии", "Механическое оборудование цехов по производству цветных металлов", "Художественная ковка", "Оборудование по художественной ковке" и др. За цикл учебников им получена премия I степени Министерства образования СССР. Лев Соломонович являлся научным руководителем и консультантом более 30 кандидатов и 5 докторов технических наук. Л.С. Кохан был членом редакционной коллегии журнала "Технология металлов".

Л.С. Кохану присвоено звание "Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации", он — лауреат премии Правительства Российской Федерации в области образования.

Лев Соломонович — специалист высочайшего уровня, более 50 лет жизни посвятил работе в высшей школе, передаче своего богатейшего опыта и знаний студентам, аспирантам и докторантам.

Светлая память о Льве Соломоновиче Кохане навсегда останется в сердцах друзей, коллег и учеников! Коллектив редакции и редакционный совет журнала выражают глубокие соболезнования родным и близким Льва Соломоновича.

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 06.03.2018. Подписано в печать 04.04.2018. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

zp418.indd 192 05.04.2018 12:25:21