ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ (Кузначно-прассовоа, литайноа и другиа производства)

Издается с января 2003 г.

Том 17 № 11 ноябрь 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Кузнечно-штамповочное производство

Ларин С.Н., Кухарь В.Н. 80 лет кафедре "Механика пластического формоизменения"	
Тульского государственного университета	.495
Ларин С.Н., Пасынков А.А., Бессмертная Ю.В. Исследование силовых режимов	
при многооперационной вытяжке с локальным пластическим деформированием	.498
Еронько С.П., Смирнов Е.Н., Ткачев М.Ю., Ковалева О.А. Механические ножницы	
для качественной резки тонкостенных труб на заготовки	.502

Прокатно-волочильное производство

Материаловедение и новые материалы

Информация

Сварка. Гибридная лазерно-дуговая сварка сталей, никеля и никелевых сплавов. Уровни качества для дефектов по ГОСТ ISO 12932—2017. (*Продолжение*)......518

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением; 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии; 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности; 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.04 — Литейное производство; 05.16.05 — Обработка металлов давлением; 05.16.06 — Порошковая металлургия и композиционные материалы; 05.16.08 — Нанотехнологии и наноматериалы 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.

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.

Председатель

редакционного совета

Редакционный совет:

БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф. ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф. ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф. ГУН И.Г., д.т.н., проф. ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф. ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф. КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф. КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф. КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц. КОТЕНОК В.И., д.т.н. КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф. КРУК А.Т., д.т.н., проф. КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц. МОНАСТЫРСКИЙ В.П., д.т.н. 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. ФИГУРОВСКИЙ Д.К., к.т.н., доц. ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф. ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф. ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф. БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof. 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









© Издательство "Инновационное машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2019

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING (Press forging, foundry and other productions)

Published since 2003, January

Vol. 17 № 11 November 2019

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

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

Editorial Assistant SERIKOVA E.A.

Editorial Committee BLANTER M.S. GARIBOV G.S. GROMOV V.E. GUN I.G. EVSYUKOV S.A. ERSHOV M.Yu. KASATKIN N.I. KIDALOV N.A. KOROTCHENKO A.Yu. KOTENOK V.I. KOSHELEV O.S. KRUK A.T. KUKHAR' V.D. LARIN S.N. MONASTYRSKY V.P. MOROZ B.S. MURATOV V.S. NAZARYAN F A NURALIEV FA OVCHINNIKOV V V POVAROVA K B POI FTAEV V A SEMENOV B L TREGUBOV VI FIGUROVSKY D.K. SHATUL'SKY A.A. 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



Foundry and Welding Productions

Forging and Stamping Production

Larin S.N., Kukhar' V.N. 80 years of department "Mechanics of plastic forming" of Tula	105
Larin S.N., Pasynkov A.A., Bessmertnava Yu.V. Study of power modes in multi-	195
operation local plastic deformation drawing	498
Eron'ko S.P., Smirnov E.N., Tkachev M.Yu., Kovaleva O.A. Mechanical shears for high-	
quality cutting of thin-walled tubes to blanks	502

Rolling and Drawing Production

Physical Metallurgy and New Materials

Romanov D.A., Moskovsky S.V., Sosnin K.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Filyakov A.D., Protopopov E.V. Increase in properties of copper electrical contact due to its processing by plasma formed at explosion of silver foil with weighed sample of zinc oxide powder511

Information

Welding. Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys. Quality levels for imperfections by GOST ISO 12932—2017. (*Continuation*)......518

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: 05.02.09 — technologies and forming machines; 05.02.10 — welding, related processes and technologies; 05.04.11 — nuclear reactor engineering, machines, units and materials technology of nuclear industry; 05.16.01 — physical metallurgy and heat treatment of metals and alloys; 05.16.04 — foundry; 05.16.05 — plastic metal forming; 05.16.06 — powder metallurgy and composite materials; 05.16.08 — nanotechnologies 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", 2019

литейное и сварочное

ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.742.4

Н.А. Кидалов, Н.А. Осипова, И.Е. Поташова, К.О. Рыбальченко (Волгоградский государственный технический университет)

Использование хромитового песка в холоднотвердеющих формовочных смесях для No-bake-процесса

Представлены результаты исследования, подтверждающие возможность исключения операции окрашивания форм и стержней из технологического процесса при использовании хромитового песка в холоднотвердеющих формовочных смесях для No-bake-процесса.

Ключевые слова: холоднотвердеющая смесь; смола; No-bake-процесс; хромитовый песок; кварцевый песок.

The results of proving the possibility of excluding the dressing staining operation moulds and cores from technological process when using of chromite sand in cold-hardening sands for No-bake-process are presented.

Keywords: cold-hardening sand; resin; No-bake-process; chromite sand; quartz sand.

Литейное производство является наиболее наукоемким, энергоемким и материалоемким производством. В себестоимости литья энергетические затраты и топливо составляют 50...60 %, стоимость материалов 30...35 %, в частности, на 1 т отливок требуется переработка и подготовка 3...5 т формовочных песков (при литье в песчано-глинистые формы), 3...4 кг связующих материалов и красок (при литье в формы из холоднотвердеющих смесей (XTC)).

Решение первоочередных задач, стоящих перед отраслью — "принципиально другое качество отливок и снижение себестоимости", невозможно без внедрения новых технологических процессов. За период с 2010 по 2016 г. в России производство отливок в формах из XTC увеличилось на 11 % [1].

В настоящее время широко применяют безопочную формовку "сухих" стержневых форм для стальных отливок по No-bake-процессу, основанному на использовании XTC, затвердевающих без внешнего воздействия.

Улучшение чистоты поверхности стальных отливок достигается, как правило, окрашива-

нием противопригарными покрытиями форм и стержней с последующей их подсушкой, вследствие чего производственный цикл удлиняется, а производительность оборудования комплексно-механизированных линий снижается. Предположено, что исключение операции окрашивания из технологического цикла приведет к увеличению производительности и уменьшению себестоимости продукции.

В целях подтверждения данного предположения проведено исследование по замене в составах XTC обогащенного кремнеземисто-го наполнителя высокоогнеупорным хромитовым песком $FeO \cdot Cr_2O_3$. Выбор хромитового песка обусловлен его физико-химическими свойствами, которые позволяют получать отливки без пригара.

Хромитовый песок имеет высокую температуру плавления (2150 °С), низкую температуру спекания (1100 °С) и высокую теплоаккумулирующую способность, инертен к оксидам железа при высоких температурах в любой газовой атмосфере, плохо смачивается жидким металлом. Все эти факторы при изготовлении

Cuara	Плотность,	Вязкость,	Соде	ержание, %	
Смола	г/см ³	МПа∙с	азота	свободного формальдегида	
ASKURAN-381	1,141,16	2550	≤1,01,5	< 0,05	
АЛЬФАБОНД	1,231,25	50250	< 1,0	< 0,1	

1. Свойства исследуемых смол [3]

стальных отливок способствуют предотвращению образования химического и механического пригара, ужимин, улучшают условия кристаллизации металла [2].

Исследовали ХТС двух составов, содержащие разные виды смол (табл. 1): фурановую (ASKURAN-381) для No-bake Фуран-процесса и фенолоформальдегидную (АЛЬФАБОНД) для Alfa-set-процесса.

В качестве наполнителей использовали хромитовый песок AFS-45-55 (ТУ 0741-001-23081308—12) и обогащенный кварцевый песок $2K_2O_1O_2$ (табл. 2, 3), которые значительно отличаются между собой по химическому и зерновому составу.

Смеси изготовляли в лабораторном смесителе для XTC (рис. 1), масса замеса 500 г.

Порядок приготовления XTC: в смеситель засыпали огнеупорный наполнитель — песок, затем последовательно вводили отвердитель и смолу. Время перемешивания песка с отвер-

2. Сравнительный анализ зернового сост	гава песков
хромитового AFS-45-55/кварцевого обогащен	ного 2K ₂ O ₁ 02

Размер ячейки сита, мм	Остаток на сите, %			
0,710/1,0	0,16/—			
0,500/0,63	7,12/—			
0,355/0,4	25,44/7,6			
0,250/0,315	24,98/21,6			
0,180/0,20	24,24/54,8			
0,125/0,16	12,72/11,4			
0,090/0,1	4,96/2,8			
>0,090/0,063	2,38/—			

дителем 10...20 с, затем вводили смолу и перемешивали в течение 10...15 с. Общее время приготовления смеси составляет 20...35 с.

Для определения прочностных и технологических свойств ХТС на лабораторном копре 2M030 изготовляли стандартные цилиндрические образцы (ГОСТ 29234—91) диаметром и высотой 50 мм. Заданная плотность достигалась тремя ударами копра. Весь цикл изготовления образцов составил 20 с. Образцы



Рис. 1. Смеситель для изготовления ХТС

	Содержание минералов, %						
Песок	Cr ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	Глинистая составляющая
Хромитовый AFS-45-55	47,80	25,49	_	16,2	9,88	0,29	—
Кварцевый обогащенный 2K ₂ O ₁ 02	—	—	0,4	—	_	99,2	0,4

3. Химический состав исследуемых песков

	Составляющая смеси, мас. ч.							
	Пе	сок	См	ола	Отвердитель			
Номер смеси	хромитовый АFS-45-55	кварцевый обогащенный 2K ₂ O ₁ 02	АЛЬФАБОНД	ASKURAN-381	A-10	HARTER RAPID 05		
1	96,3	_	2.0		0.7			
2		96,3	3,0	_	0,7	_		
3		98,05		1.5		0.45		
4	98,05	_	_	1,3		0,43		

4. Составы исследуемых смесей

выдерживали на воздухе в течение 15; 30; 60; 180; 240 и 1440 мин.

Свойства смесей: газопроницаемость, влажность, прочность при сжатии (далее прочность) образцов, выдержанных на воздухе по указанному выше режиму, определяли по стандартным методикам. Для определения прочности образцы испытывали на сжатие на машине LRu. Составы и свойства исследуемых смесей представлены в табл. 4, 5.

Установлено, что прочность смесей, изготовленных на хромитовом песке и кварцевом обогащенном песке со смолой ASKURAN-381 (рис. 2), повышается с увеличением времени выдержки на воздухе. Манипуляторная прочность, необходимая для извлечения стержня из ящика (>0,8 МПа) [2], у смеси на хромитовом песке достигается через 15 мин выдержки образцов на воздухе, а для смеси на кварцевом песке такой показатель прочности достигается через 30 мин. Далее все последующее время отверждения прочность двух смесей продолжает равномерно и незначительно расти. После 4 ч отверждения увеличение прочности происходит с разной скоростью и в результате



Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии образцовцилиндров XTC со смолой ASKURAN-381 от времени отверждения на воздухе



Рис. 3. Зависимость предела прочности при сжатии XTC со смолой ASKURAN-381 от времени выдержки (живучести смеси) после изготовления

через 24 ч прочность XTC на хромитовом песке на 1,3 МПа больше, чем прочность XTC на кварцевом песке.

В ходе эксперимента определено, что XTC на хромитовом песке со смолой ASCURAN-381 обладает удовлетворительными технологическими свойствами (см. табл. 5) и сохраняет живучесть в течение 60 с (рис. 3).

Номер	Влаж-	Газо- проницае-	Гигро- скопичность.	Осыпаемость,	Газо- творность.	Преде	ел проч ва врем	ности я отве	при сх рждени	катии, 1я, мин	МПа, н							
смеси	ность, %	мость, ед.	%	%	см ³	15	30	60	180	240	1440							
1	2.0	210	0,3	0,1	0,1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		1,06	1,17	1,5	1,54	1,6	1,7
2	2,0	200	0,4			40.45	0,75	0,85	1,51	2,14	2,24	2,45						
3	1.0	220	0.2	0,25		0,25	4,04,5	0,65	1,85	2,3	2,4	2,5	2,6					
4	1,0	220	0,2	0,20		1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,9							

5. Свойства исследуемых смесей

Формовочная смесь, изготовленная на хромитовом песке с использованием водной смолы АЛЬФАБОНД, имеет прочностные характеристики в среднем на 40 % ниже, чем аналогичная смесь со смолой ASKURAN-381, но тем не менее достаточные для проведения технологических операций, при этом манипуляторная прочность достигается за 15 мин (рис. 4).

Живучесть XTC на хромитовом песке со смолой АЛЬФАБОНД составляет 15 с (рис. 5), что в 2 раза ниже такого же показателя XTC на хромитовом песке со смолой ASKURAN-381, осыпаемость — 0,1 %, гигроскопичность — 0,3 %. Такое различие показателей можно объяснить водной природой смолы АЛЬФАБОНД.

Остаточная прочность при сжатии XTC на хромитовом песке со смолой ASKURAN-381 и со смолой АЛЬФАБОНД после прокалки образцовцилиндров при температуре 800...1000 °C в течение 45 мин и последующем охлаждении —



Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии образцовцилиндров XTC со смолой АЛЬФАБОНД от времени отверждения на воздухе



Рис. 5. Зависимость предела прочности при сжатии XTC со смолой АЛЬФАБОНД от времени выдержки (живучести смеси) после изготовления

нулевая, т.е. в печи образцы рассыпались, это характеризует хорошую выбиваемость смоляных XTC на хромитовом песке.

Для оценки противопригарных свойств ХТС на хромитовом песке провели испытания разработанных смесей в условиях заливки формы сталью 45Л. Изготовили литейную форму, состоящую из трех частей (рис. 6). Одну часть формы (рис. 6, *a*) изготовили из ХТС на хромитовом песке (смесь № 4, см. табл. 4), а две другие части формы — из ХТС на кварцевом обогащенном песке (смесь № 3, см. табл. 4) и после отверждения одну из двух частей (рис. 6, *в*) покрывали цирконовой противопригарной краской.

После изготовления форму выдерживали на воздухе в течение суток, затем заливали сталью 45Л. Верхние части отливок, полученных в форме, показаны на рис. 7.



Рис. 6. Литейная форма:

a — на хромитовом песке; δ — на кварцевом обогащенном песке; e — на кварцевом обогащенном песке с покрытием поверхности цирконовой краской





В результате проведенного эксперимента получены отливки без пригара в форме на хромитовом песке (см. рис. 7, *a*) и в форме на обогащенном кварцевом песке, окрашенной противопригарной цирконовой краской (см. рис. 7, *в*). Отливка, изготовленная на кварцевом обогащенном песке без окрашивания (см. рис. 7, *б*), имеет на поверхности пригар. Это подтверждает предположение о том, что возможно исключение из технологического процесса операции окраски стержней и форм из XTC при условии замены в составе смеси кварцевого обогащенного песка на хромитовый песок. В этом случае снижается трудоемкость изготовления стержней и форм.

Учитывая, что стоимость хромитового песка превышает стоимость кварцевого в несколько раз, для экономии рекомендуется использовать хромитовый песок в XTC, предназначенных для облицовки форм толщиной до 15...20 мм, которая позволяет обеспечить чистоту поверхности стальных отливок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дибров И.А. Состояние и перспективные технологии развития литейного производства России // Литейщик России. 2013. № 9. С. 14—23.

2. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник / А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский и др. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.

3. Холоднотвердеющие смеси для No-bakeпроцесса / Н.А. Кидалов, Н.А. Осипова, И.Е. Поташова, К.О. Рыбальченко, В.В. Лысоченко // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Том 17. № 3. С. 99—102.

Николай Алексеевич Кидалов, д-р техн. наук, nich@vstu.ru;

Нионилла Александровна Осипова, канд. техн. наук; Инна Евгеньевна Поташова, канд. экон. наук; Кирилл Олегович Рыбальченко



УДК 621.791.72.052:620.192.47(047)

Р.В. Егоров (ООО "Национальная экспертно-диагностическая компания", г. Москва), **В.В. Овчинников** (Московский политехнический университет)

Электронно-лучевая сварка деталей из алюминиевых деформируемых сплавов

Приведены результаты исследований свариваемости деформируемых алюминиевых сплавов различных систем легирования в условиях электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Прочностные и пластические характеристики основного металла и сварных соединений алюминиевых сплавов в значительной степени зависят от вида полуфабриката и ориентации по отношению к деформированной структуре сварного ива и прикладываемых при испытаниях сил. При статическом растяжении сварных образцов долевого направления разрушение чаще всего происходит по металлу шва, а при испытании образцов высотного направления они разрушаются в большинстве случаев по зоне термического влияния вблизи линии сплавления. Наиболее распространенным видом внутренних дефектов при ЭЛС сплава 1420 является пористость сварного шва, наблюдаемая даже при проплавлении образцов без стыка. Из других дефектов, встречающихся в процессе выполнения ЭЛС деформируемых алюминиевых сплавов, следует отметить трещины двух типов: по центру шва и по линии сплавления.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; электронно-лучевая сварка; механические свойства; свариваемость; пористость; трещины; направление волокна; зона термического влияния.

Results of wrought aluminum alloys weldability of different alloying systems during electron-beam welding (EBW) are presented. Strength and plastic characteristics of the base metal and welded joints of aluminum alloys largely depend on the type of semi-finished product and orientation in relation to the deformed structure of weld and forces applied in testings. During the static tension of parallel to grain flow welded samples, fracture most often occurs along the weld metal, and when testing of the elevation samples they are destroyed in most cases by heat affected zone near the fusing line. The most common type of internal defects in EBW of alloy 1420 is weld porosity observed even during penetration without joint of samples. Among the other defects occurring during the EBW of wrought aluminum alloys, two types cracks should be noted: in the weld center and in the fusion line.

Keywords: aluminum alloys; electron-beam welding; mechanical properties; weldability; porosity; cracks; grain flow; heat affected zone.

Введение. В конструкциях современных самолетов и других летательных аппаратов достаточно широко применяют высокопрочные алюминиевые сплавы. Одним из способов создания силовых элементов конструкций, в максимальной степени позволяющим сохранить исходные свойства сплавов, является электронно-лучевая сварка (ЭЛС).

В качестве одного из первых объектов использования ЭЛС для соединения заготовок высокопрочных алюминиевых сплавов были выбраны крупномасштабные шпангоуты топливных баков из сплава 1420, которые свариваются из нескольких штампованных заготовок с длиной шва 500...1350 мм.

В зоне расположения сварного шва шпангоуты имеют сечение в виде оребренных тонкостенных двутавров с высотой стенки до 112 мм. В заготовках эти сечения за счет технологических припусков, удаляемых после сварки, выравнивали до прямоугольного сечения. Сварку выполняли по так называемым "молоткам" в нижнем положении на технологической подкладке. Ширина "молотка" на каждой заготовке составляла 30...50 мм [1].

При изготовлении начальных партий шпангоутов заготовки перед сваркой подвергали только промежуточной механической обработке, а окончательно шпангоут обрабатывали после сварки. В дальнейшем заготовки поступали на сборку в окончательно обработанном виде (за исключением "молотков" в зоне сварки).

Все операции по сварке выполняли на электронно-лучевой установке ЭЛУ-20МК разработки АО "НИАТ", оснащенной энергоблоком ЭЛА-60/60 (ускоряющее напряжение 60 кВ; мощность 60 кВт).

Технология ЭЛС по выровненному за счет припусков сечению (сварка по "молоткам") является хорошо отработанным технологическим вариантом на деталях из высокопрочных сталей и титановых сплавов, поэтому основные трудности, возникающие при ЭЛС высокопрочных алюминиевых сплавов, были связаны с характерными особенностями этих сплавов.

При ЭЛС сплава 1420 значительно чаще, чем при сварке стали ЭП817, титановых сплавов или сплава АМг6 возникают высоковольтные пробои в электронной пушке, что приводит к появлению в сварном шве трудно исправляемых дефектов типа "кратер". Поэтому в целях повышения стабильности работы энергоблока при ЭЛС сплава 1420 были усовершенствованы системы подогрева таблетки и защиты от пробоев, уменьшен диаметр отверстия в аноде, а между электронной пушкой и свариваемым изделием размещены экраны, ограничивающие поступление в лучепровод пушки паров из сварочной ванны.

Методика выполнения исследований. В процессе освоения технологии ЭЛС шпангоутов из сплава 1420 было получено большое число образцов толщиной 20...120 мм, изготовленных из различных полуфабрикатов (прессованные полосы, поковки, "молотковые" части шпангоутов). Непосредственно перед сваркой образцы подвергали общепринятой для сплава 1420 упрочняющей термической обработке: закалка с 460 °С и искусственное старение 120 °С, 12 ч. Сварку осуществляли с варьированием скорости сварки в диапазоне 10...40 м/ч в нижнем положении на технологической подкладке и без подкладки горизонтальным лучом.

Предварительными экспериментами подбирали режим сварки, обеспечивающий полное



Рис. 1. Клиновидная форма шва при электронно-лучевой сварке сплава 1420 толщиной 60 мм (шлиф после сварки анодирован)

проплавление образца и получение шва с наибольшей клиновидностью (рис. 1).

Для испытаний на статическое растяжение использовали круглые образцы с диаметром рабочей части 5 мм со швом посередине, для определения ударной вязкости — образцы сечением 10×10 мм с полукруглым надрезом. Малоцикловые испытания проводили на плоских образцах шириной 30 мм и толщиной 3...8 мм, а для определения угла изгиба применяли образцы сечением 15×3 мм.

Результаты исследований и их обсуждение. В табл. 1 представлены механические свойства основного металла и сварных соединений для некоторых полуфабрикатов из сплавов 1420 и AMr6.

Прочностные и пластические характеристики основного металла и сварных соединений сплава 1420 в значительной степени зависят от вида полуфабриката и от ориентации по отношению к деформированной структуре сварного шва и прикладываемых при испытаниях сил.

Наиболее наглядно это проявляется при испытании образцов из прессованных полос прямоугольного сечения, деформированная структура в которых, как правило, упорядочена и совпадает с контуром сечения. Для полуфабриката сечением, близким к квадратному, при испытании образцов в поперечном и высотном направлениях получены примерно одинаковые результаты; в полосах с резко выраженным неравноосным сечением высотное направление, совпадающее с меньшей стороной сечения, является наиболее слабым. Причем, если разница значений предела прочности о_в

						Малоциклов	ая усталость
Сплав, полуфабрикат	Зона испытаний	Направ- ление волокна	σ _в , МПа	<i>КС</i> U, кДж/м ²	Угол изгиба α, °	σ _{max} , МПа	Ν
1420, прессованная полоса	ОМ	п	487	135	22		
сечением 250×50 мм	CC		362	77	31	_	_
	ОМ	π	471	225		216	28 700
1420, прессованная полоса сечением 100×35 мм	66	Д	332	177] _	216	20 500
		В	280	12		_	_
	OM	Д	476	147	37	294	38 280
1420, поковка из прутка		П	378	20	_	-	
диаметром 160 мм		В	370	20			_
	CC	Д	377	19,6	16	294	10 500
		Д	455	219	30		
1420	ОМ	П	454	_			_
1420, штамповка		В	438	50			
	CC	Ду	373	39	20	196	260 000
1420, прессованный	ОМ	Π	506	74		—	_
профиль	CC	Д	383	42		196	121 330
АМг6, поковка из прутка диаметром 120 мм	ОМ	п	354	201			
	CC	11	351	215		_	_
Примечание. Приведен Обозначения: ОМ — ос	ны средние ар сновной метал	ифметичес 1л; СС — с	кие значения варное соеди	величин по нение; П, В, ,	результатам 1 Д, Ду — попеј	0 испытаний. речное, высот	ное, долевое

1. Механические свойства основного металла и сварных соединений полуфабрикатов из сплавов 1420 и АМгб

и долевое условное направления; σ_{max} — максимальное напряжение цикла; N — число циклов до разрушения.

для образцов долевого и высотного направлений составляет 15...20 %, то значения относительного удлинения δ и ударной вязкости *KC*U различаются более чем в 2—3 раза.

В поковках эти направления могут не совпадать с геометрическими параметрами заготовки (длина, ширина, высота). В поковках деформированная структура имеет еще более сложный характер (рис. 2), поэтому при испытании свойств сварных соединений за условное долевое направление принято направление максимального габаритного размера штамповки, что не всегда совпадает с истинным направлением волокна.

Предел прочности сварного соединения при ЭЛС сплава 1420 для всех исследованных полуфабрикатов составлял 70...80 % предела прочности основного металла, испытанного в аналогичном по отношению к деформированной структуре направлении. Примерно в таком же отношении находятся значения твердости основного металла и зоны термического влияния. Общая ширина зоны разупрочнения при ЭЛС сплава 1420 толщиной 50...100 мм равна 20...70 мм.

При статическом растяжении сварных образцов долевого направления разрушение чаще всего происходит по металлу шва, а при испытании образцов высотного направления они разрушаются в подавляющем большинстве случаев по зоне термического влияния вблизи линии сплавления.

При ударных испытаниях сварных соединений из сплава 1420 наиболее низкие значения *КС*U (часто менее 10 кДж/м²) имеют образцы высотного направления, в которых линия сплавления параллельна строчечным выделениям хрупких интерметаллидных фаз по границам зерен. При этом разрушение идет именно по этим выделениям вблизи линии сплавления (рис. 3), а поверхность разрушения образца выглядит как практически ровная поверхность, перпендикулярная оси образца с характерной для высотных образцов структурой межзеренных расслоений. Однако и при испытании долевых образцов *КС*U сварных соединений сплава 1420, как правило, не превышает 100 кДж/м².

Обычно для образцов с надрезом по линии сплавления *КС*U имеет несколько меньшие значения, чем для образцов с надрезом по центру шва, но на фоне общего разброса значений эта разница несущественна и ею можно пренебречь. Например, вся совокупность результатов, полученных при испытании более чем 100 образцов обоих типов из штампованных заготовок сплава 1420, в диапазоне 2...6 кДж/м². Для сравнения: ударная вязкость сварных образцов при ЭЛС сплава АМг6 находится в интервале 150...350 кДж/м².

Наиболее распространенным видом внутренних дефектов при ЭЛС сплава 1420 является пористость сварного шва, наблюдаемая даже при проплавлении образцов без стыка. По мнению авторов статьи, основная причина пористости — недостаточная чистота исходного материала, а также интенсивное испарение в сварочной ванне элементов с высокой упругостью пара (Mg, Li) [2—5].

Шабрение стыка перед сваркой снижает пористость сварного шва, однако в силу плохой контролируемости качества шабрения оно не может гарантировать стабильности получаемых в производстве результатов. Техноло-



Рис. 2. Взаимное расположение шва и деформированной структуры при электронно-лучевой сварке поковки сплава 1420



a)

б)



в)

Рис. 3. Сварной образец высотного направления (a), разрушение образцов при испытаниях на ударную вязкость (δ) и распространение трещины (s, ×68) при испытаниях

гическими приемами, уменьшающими пористость, являются снижение скорости сварки до 10...12 м/ч, а также осуществление повторных проходов на рабочем режиме с полным проплавлением. Причем эффективность повторных проходов тем выше, чем больше время между проходами. Наиболее хорошие результаты получены при повторной сварке по полностью остывшему металлу. Многопроходная сварка с интервалом между проходами менее 5 мин может привести к противоположному результату, т.е. к увеличению пористости в шве.

Из других дефектов, встречающихся в процессе выполнения ЭЛС сплава 1420, следует отметить трещины двух типов: по центру шва и по линии сплавления. Трещины по центру шва — типичные горячие трещины, возникающие при недостаточной жесткости сварного соединения. Они образуются в основном при сварке свободно лежащих образцов небольшой ширины, толщиной до 10 мм, при режимах, характеризующихся получением широкого шва. При сварке образцов, закрепленных в жесткой технологической оснастке, эти трещины не обнаружены.

Второй тип трещин встречается, как правило, при сварке образцов большой толщины. Экспериментально они наиболее просто могут быть получены при проплавлении массивных образцов несколькими параллельными швами (рис. 4, *a*) или при проплавлении узкого образца (рис. 4, *б*). В последнем случае вероятность их появления возрастает с увеличением скорости сварки и тока луча. На деталях трещины подобного типа иногда образуются при отбивании технологических платиков, а также при дуговой подварке электронно-лучевых швов. Подобные трещины встречаются нечасто, однако они указывают на наименее прочную зону в сварном соединении из-за низкой пластичности материала в этой зоне.

Практический опыт показал, что с увеличением толщины заготовок ухудшаются показатели их прочности и пластичности. Также при оформлении зоны стыка штамповок в виде толстостенного "молотка" не всегда удается избежать неблагоприятного направления деформированной структуры по отношению к сварному шву. В связи с этим перспективным является способ ЭЛС деталей из сплава 1420 непосредственно по сплошному сечению без выравнивания его под прямоугольник. При этом технологический припуск высотой 2...3 мм по периметру сечения служит только для компенсации возможных неполномерностей шва в местах с неблагоприятным формированием.

Максимальный экономический эффект от внедрения ЭЛС по сплошному сечению следует ожидать при замене заготовок в виде прессованных полос большой толщины поковок и грубых штамповок на прессованные тонкостенные панели и профили.

Многочисленные эксперименты по ЭЛС прессованных профилей различного сечения, а также ребристых панелей с высотой ребра 30...50 мм доказали практическую пригодность

подобной технологии при изготовлении деталей из сплава 1420. Формы стыков деталей, свариваемых электронным лучом, показаны на рис. 5.

Образец, иллюстрирующий оформление стыка под сварку, приведен на рис. 6. Сварку деталей осуществляли при фиксированных значениях тока фокусировки и скорости сварки 30 м/ч. Ток луча выбирали из условия гарантированного проплавления сечения в местах наибольшей толщины, в процессе сварки он оставался неизменным. Для предохранения технологической оснастки от повреждения под действием электронного луча за свариваемым стыком устанавливали поглощающие экраны многоразового использования из материала, аналогичного свариваемому материалу.



Рис. 5. Примеры формы свариваемых стыков при сборке каркасных элементов из сплава 1420



Рис. 6. Пример подготовки деталей из прессованного профиля к электронно-лучевой сварке





Наиболее хорошие результаты по формированию шва обеспечиваются при ЭЛС профилей с толщиной стенок сечения 10...15 мм. Свойства получаемых сварных соединений приведены в табл. 1.

В связи с относительно большими размерами свариваемых профилей в направлении действия электронного луча и малой ширины швов серьезными проблемами при освоении ЭЛС сплошных сечений являлись сборка свариваемых заготовок с минимальным зазором и совмещение траектории перемещения луча с плоскостью стыка.

Обычно в условиях серийного производства получение ответственных деталей с требуемой прочностью в части окончательной конфигурации, зазоров, прямолинейности стыка и положения его относительно электронной пушки сопряжено с большой и трудоемкой работой по выверке и согласованию баз в различных приспособлениях: осях для механической обработки, сборки и сварки. В условиях опытного производства была применена технология совместной обработки двух заготовок, их сборки и последуюшей сварки в одном и том же приспособлении. При этом конструкция приспособления позволяла раздвигать закрепленные в нем заготовки на диаметр фрезы, одновременно одной фрезой обрабатывать плоскость стыка на обеих заготовках, после обработки вплотную сдвигать их и обрабатывать по сопрягаемым плоскостям. При данной технологии достигалась практически идеальная сборка стыка с сохранением требуемой точности общего контура детали.

Технологические возможности электроннолучевой установки ЭЛУ-20МК были существенно расширены в результате применения специально сконструированного и изготовленного механизма поворота пушки по полярной координате вокруг точки, расположенной на некотором расстоянии от ее среза. Например, при сварке шпангоутов использование этого механизма значительно упростило процедуру выставления технологической оснастки на рабочем столе установки. Повысилась точность совмещения луча с плоскостью сложнопрофильных стыков.

Положительные результаты ЭЛС ряда деталей из алюминиевых сплавов со сплошным сечением стыка дают основание для расширения применения указанной технологии в производстве [6—9].

В табл. 2 приведены механические свойства сварных соединений деформируемых алюминиевых сплавов различных систем легирования, выполненных электронным лучом.

Анализ полученных результатов испытаний показал, что коэффициент прочности сварного соединения изменяется в зависимости от системы легирования сплава. Для алюминиеволитиевых сплавов 1460 и В-1469 коэффициент прочности сварных соединений составляет 0,52 и 0,79 соответственно. Для сплава 1565ч коэффициент прочности сварного соединения равен 0,87. У сплава В-1579 системы легирования Al—Mg—Sc коэффициент прочности составляет 0,90, в то время как для соединений традиционного сплава 1201 — 0,56.

Сплав		Davia	Предел	Vaca	KCU, 1	кДж/м ²
(система легирования)	Полуфабрикат	зона испытаний	прочности σ _в , МПа	утол изгиба, °	по шву	по зоне сплавления
1460	Плита,	ОМ	525	25	61	
(Al-Cu-Li)	толщина 55 мм	CC	272	27	36	
B-1469	Плита,	ОМ	530	22	71	_
(Al-Cu-Li)	толщина 45 мм	CC	423	21	53	
1565ч	Плита, толщина 30 мм	ОМ	450	76	201	
(Al-Mg-Zn)		CC	391	64	190	198
B-1341	Прессованный профиль,	ОМ	385	36	96	_
(Al-Mg-Si)	толщина 18 мм	CC	280	23	80	87
B-1579	Плита,	ОМ	350	100	205	
(Al-Mg-Sc)	толщина 20 мм	CC	315	80	190	_
1201	Плита,	ОМ	465	67	125	
(Al-Cu-Mn)	толщина 25 мм	CC	261	55	93	112
Примечание. Н	аправление волокна — пр	одольное.				

2. Механические свойства основного металла и сварных соединений деформируемых алюминиевых сплавов различных систем легирования

Выводы

1. Электронно-лучевая сварка позволяет выполнять соединения деформируемых алюминиевых сплавов по выровненному сечению толщиной 25...100 мм и по переменному сечению.

2. При ЭЛС алюминиевых сплавов по переменному сечению наиболее хорошие результаты по формированию шва обеспечиваются при ЭЛС профилей с толщиной стенок сечения 10...15 мм.

3. Наиболее распространенным видом внутренних дефектов при ЭЛС алюминиевых сплавов является пористость сварного шва, наблюдаемая даже при проплавлении образцов без стыка. Из других дефектов, встречающихся в процессе выполнения ЭЛС алюминиевых сплавов, следует отметить трещины двух типов: по центру шва и по линии сплавления. Трещины по центру шва по характеру являются типичными горячими трещинами, возникающими при недостаточной жесткости сварного соединения.

4. Коэффициент прочности сварных соединений деформируемых алюминиевых сплавов в зависимости от системы легирования изменяется от 0,52 (для сплава 1460) до 0,90 (для сплава B-1579).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасименко А.В., Лысенков Ю.Т. Интегрированные технологии и многофункциональное оборудование для электронно-лучевой сварки // Авиационная промышленность. 2000. № 3. С. 66—70.

2. Влияние технологических факторов на пористость швов на алюминии, выполненных электроннолучевой сваркой / А.А. Бондарев, Н.М. Воропай, А.Я. Ищенко и др. // Автоматическая сварка. 1972. № 8. С. 24—26.

3. **Овчинников В.В., Дриц А.М.** Сравнительные исследования свойств сварных соединений российских и американских алюминиево-литиевых сплавов // Цветные металлы. 2003. № 12. С. 71—77.

4. Дриц А.М., Овчинников В.В. Технологические аспекты сварки плавлением алюминиевого сплава 1460 // Перспективные технологии легких и специальных сплавов / к 100-летию со дня рождения академика А.Ф. Белова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. С. 339—347.

5. **Овчинников В.В., Егоров Р.В.** Пористость швов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов, легированных литием // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 4. С. 1—5.

6. Особенности электронно-лучевой сварки прессованных полос высокопрочного алюминиевого сплава системы Al—Zn—Mg—Cu / В.В. Овчинников, В.С. Магнитов, Е.Н. Иода, Р.Н. Растопчин, М.А. Гуреева // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 11. С. 9—13.

7. Структура и свойства сварных соединений алюминиевого сплава В-1469, полученных электронно-лучевой сваркой / В.В. Овчинников, О.Е. Грушко, В.В. Алексеев, В.С. Магнитов, Р.В. Егоров // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 5. С. 7—11.

8. **Овчинников В.В.** Электронно-лучевая сварка новых деформированных алюминиевых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 1. С. 11—16.

9. Исследование влияния скорости ЭЛС на химический состав, структуру и свойства сварных соединений сплава Д16 / В.К. Драгунов, Е.В. Терентьев, А.Л. Гончаров, А.Ю. Марченков // Сварочное производство. 2015. № 12. С. 17—21.

Роман Викторович Егоров, канд. техн. наук; Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук, vikov1956@mail.ru



КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ

производство



С.Н. Ларин, В.Н. Кухарь (Тульский государственный университет)

80 лет кафедре "Механика пластического формоизменения" Тульского государственного университета

Осенью 2019 г. исполняется 80 лет одной из старейших кафедр Тульского государственного университета кафедре "Механика пластического формоизменения" (ранее кафедра "Технология штамповочного производства")

В 1939 г. в соответствии с требованиями промышленности в действующем тогда Тульском механическом институте (ТМИ) была организована подготовка специалистов по холодной и горячей обработке металлов давлением.

В довоенное и военное время подготовку специалистов осуществляли по ускоренным учебным программам.

После окончания войны подготовку студентов вели по нормальной учебной программе. На кафедру пришли молодые преподаватели: К.В. Лебедев, В.В. Шевелев, И.П. Обозов, Б.И. Успенский и опытные производственники: С.В. Аврутин, В.И. Давыдов, А.Н. Малов, а также И.П. Ренне, окончивший первый выпуск в ТМИ по специальности "Горячая штамповка".

С 1946 по 1954 г. кафедрой "Технология штамповочного производства" руководил А.Н. Малов, а в период с 1954 по 1956 г. и с 1956 по 1961 г. заведующими кафедрой были доцент И.П. Ренне и профессор Е.А. Попов.

С приходом на кафедру молодых преподавателей значительно активизировалась научная деятельность. Основное научное направление кафедры было связано с исследованием процессов вытяжки с утонением стенки, обжима краевой части заготовки, гибки, отбортовки. Исследования по гибке листовых заготовок, выполненные И.П. Ренне, стали классическими и нашли отражение в учебниках, монографиях и справочниках по листовой штамповке.

В этот же период получили начальное развитие идеи нового метода исследования деформированного состояния при сложном нагружении в процессах обработки металлов давлением с помощью координатной сетки, разработанные И.П. Ренне. Этот метод широко применяют и в настоящее время при анализе процессов штамповки.

Результаты проведенных исследований стали основой для защиты кандидатских диссертаций. В 1953 г. И.П. Ренне защитил кандидатскую диссертацию, в 1963 г. — И.П. Обозов, а в 1957 г. докторскую диссертацию защитил Е.А. Попов.

С 1956 по 1962 г. на кафедре основное внимание уделялось исследованию совмещенных процессов листовой штамповки в целях их интенсификации, разработке методики построения кривых истинных напряжений и исследованию на ее базе механических свойств некоторых листовых металлов. Это направление исследовательской работы в значительной степени обусловлено тенденцией расширения применения совмещенных процессов в современной технологии.

Одновременно проведены исследования по установлению влияния режимов термической обработки и эффективности действия смазки при горячей штамповке на стойкость и износ штампов. Изучено влияние легирующих элементов на свойства штамповых сталей и разработана методика определения износа штампов.

В 1963 г. был организован Тульский политехнический институт (ТПИ), а механикомашиностроительный факультет переименован в механический. В его состав вошла кафедра "Технология штамповочного производства", которую возглавил И.П. Ренне (1963—1970 гг.). Ему принадлежит значительная роль в подготовке научных кадров на кафедре. Им подготовлено свыше 50 кандидатов и 3 доктора технических наук.

В 1964 г. при кафедре организуется отраслевая научно-исследовательская лаборатория № 5, открывается аспирантура. К этому времени кафедра пополнилась молодыми сотрудниками, защитившими кандидатские диссертации (С.А. Валиев, А.С. Базык, С.П. Яковлев), а также способными специалистами — выпускниками и производственниками (А.С. Маленичев, Н.В. Купор, А.К. Евдокимов и др.).

Открытие ОНИЛ-5 и аспирантуры способствовало дальнейшему развитию научно-исследовательской работы, развитию связей с производством и подготовки научных кадров.

В 1971 г. И.П. Ренне защитил докторскую диссертацию, а в 1972 г. докторскую диссертацию защитил С.П. Яковлев, который в 1970 г. был назначен заведующим кафедрой и руководил ею свыше 30 лет.

Основным направлением научной деятельности С.П. Яковлева являлась разработка методов анализа и расчетов статических и динамических процессов обработки металлов давлением на основе создания обобщенных математических моделей, в которых учитываются реальные свойства анизотропии и неоднородности механических свойств материала. Эти разработки позволяют научно обосновать выбор рациональных технологических параметров процессов обработки металлов давлением, обеспечивающих интенсификацию процессов, экономию материалов и повышение качества получаемых изделий.

С.П. Яковлев являлся руководителем научной школы "Теория и технология формоизменения изотропных и анизотропных упрочняющихся материалов при различных термомеханических режимах в процессах обработки давлением".

По этому научному направлению с 1968 г. началась подготовка кадров высшей квалификации. Под научным руководством и при его консультации выполнили и защитили кандидатские диссертации свыше 100 человек. С.П. Яковлев осуществлял консультации и оказывал помощь в работе при выполнении и подготовке к защите докторских диссертаций 35 соискателей. В 2004 г. заведующим кафедрой "Механика пластического формоизменения" был назначен д-р техн. наук, профессор С.С. Яковлев — ведущий специалист в области механики формоизменения анизотропных материалов в режимах пластичности и ползучести, автор более 400 научных работ. Под его руководством выполнены и защищены 10 докторских и 48 кандидатских диссертаций. Результаты научных исследований отмечены рядом Государственных, Всероссийских и региональных премий в области науки и техники.

С 2016 г. заведующим кафедрой является д-р техн. наук С.Н. Ларин. Под его руководством кафедра также активно участвует в научной жизни университета. Ежегодно публикуется более 60 научных статей в ведущих российских и зарубежных журналах. Сотрудники кафедры регулярно участвуют в конференциях различного уровня. Активно идет подготовка научных кадров. Под руководством С.Н. Ларина заметно активизировалась научно-исследовательская работа студентов кафедры. Так, ежегодно студенты публикуют результаты своих исследований в журналах из перечня ВАК, участвуют в Международных конференциях, выигрывают конкурсы грантов.

На данный момент на кафедре работают 18 сотрудников, 6 из которых имеют ученые степени докторов наук, 8 — кандидатов наук.

В настоящее время на кафедре ведется подготовка бакалавров, магистров по трем направлениям и аспирантов. Ежегодно кафедра "Механика пластического формоизменения" выпускает около 20 бакалавров, 15 магистров. За все время на кафедре было подготовлено более 500 бакалавров, 200 магистров и 1500 специалистов.

Основные научные результаты кафедры относятся к разработке теоретических методов определения деформаций при плоском стационарном и нестационарном пластическом течении, способов решения смешанной краевой задачи, экспериментального подхода к оценке деформаций при стационарном течении на базе теории пластического течения.

На кафедре активно проводятся работы по развитию теории обработки металлов давлением анизотропных материалов при различных температурных условиях деформирования.

Научные результаты, полученные в процессе научно-исследовательской работы, способство-

КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Сергей Николаевич Ларин, д-р техн. наук, mpf-tula@rambler.ru; Владимир Денисович Кухарь, д-р техн. наук

Подготовка бакалавров ведется по направлению 15.03.01 "Машиностроение" с профилем "Машины и технологии обработки давлением".

Подготовка магистров ведется по направлению 15.04.01 "Машиностроение" и 15.04.02 "Технологические машины и оборудование" по трем программам: "Теория и технология штамповки анизотропных заготовок", "Высокоскоростные методы обработки металлов давлением" и "Высокоэффективные технологические процессы листовой и объемной штамповки".

Последние годы характеризуют кафедру новым подъемом в области научно-исследовательской и учебной работы. Постоянная связь с крупнейшими ведущими промышленными центрами и исследовательскими институтами и рядом крупнейших вузов страны позволили кафедре определить фундаментальный характер работ, состоящий в создании основ ресурсосберегающих процессов деформирования при изготовлении изделий машиностроения с высокими техническими требованиями.

Кафедра активно сотрудничает с рядом предприятий, таких как АО "НПО "Сплав", АО "КБП", АО "ЦКБА", АО "Корпорация "Тактическое ракетное вооружение", РКК "Энергия" им. С.П. Королева", а также с вузами страны: МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ "СТАНКИН", Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, НИТУ "МИСИС", ОГУ имени И.С. Тургенева, ЛГТУ и др.

Научная и практическая ценность выполненных работ позволила значительно усовершенствовать учебный процесс и провести солидную подготовку научных кадров через аспирантуру и докторантуру, открытую на кафедре в 1995 г.

На кафедре "Механика пластического формоизменения" осуществляется подготовка кадров высшей квалификации.

На протяжении многих лет сотрудники кафедры профессор, д-р техн. наук С.Н. Ларин, профессор, д-р техн. наук В.В. Черняев, профессор, д-р техн. наук Г.В. Панфилов, профессор, д-р техн. наук В.И. Трегубов, профессор, д-р техн. наук Н.М. Матченко и профессор, д-р техн. наук Н.А. Усенко принимают активное участие в работе специализированных ученых советов по присуждению степеней кандидата и доктора наук в Тульском государственном университете.

По результатам научно-исследовательской работы сотрудники кафедры неоднократно были удостоены звания лауреата премии имени С.И. Мосина (в 1976, 2002, 2006, 2008 и 2014 гг.) в области разработок военной техники, технологии и оборудования, имеющих двойное применение.

Научно-исследовательская работа, проводимая на кафедре, явилась базой для привлечения к научной деятельности студентов, подготавливаемых кафедрой.

Научно-исследовательская работа студентов на кафедре "Механика пластического формоизменения" является практической составляющей учебного процесса, способствующей углубленному пониманию роли обработки металлов давлением в развитии машиностроения и перспектив совершенствования технологий. Благодаря проводимым исследованиям студент приобретает уверенность в надежности получаемых знаний и начинают формироваться его компетентность и опыт, без которых специалист может и не состояться.

За значительный вклад в теорию и технологию обработки металлов давлением в 1997 г. кафедре было присвоено имя Н. Демидова.

Свое 80-летие кафедра "Механика пластического формоизменения" встречает значительными достижениями во всех областях своей деятельности.

Несмотря на известные трудности в сфере высшего образования кафедра сохранила свой научный потенциал.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Яковлев С.П.** 65 лет кафедре "Механика пластического формоизменения" Тульского государственного университета // Заготовительные производства в машиностроении. 2004. № 10. С. 21–24.

ханика пластического формоизменения" Тульского го-

2. Яковлев С.С., Яковлев С.П. 70 лет кафедре "Ме-

УДК 621.983

С.Н. Ларин, А.А. Пасынков, Ю.В. Бессмертная (Тульский государственный университет)

Исследование силовых режимов при многооперационной вытяжке с локальным пластическим деформированием*

Проведено моделирование вытяжки с утонением стенки за счет изменения рабочего профиля матрицы. Исследованы силовые параметры при многооперационной вытяжке с утонением стенки через несколько матриц с клиновыми выступами по периметру рабочего пояска, позволяющих получить интенсивную пластическую деформацию со значительными сдвиговыми деформациями и мелкозернистую структуру готовой детали. Выполнен анализ силовых режимов процесса. Получены зависимости, позволяющие установить влияние геометрических параметров инструмента и технологических факторов на силу исследуемой вытяжки на разных переходах.

Ключевые слова: вытяжка; интенсивные деформации; сила; формоизменение; обработка давлением.

Simulation of wall thinning drawing by changing the working profile of the die is caried out. The force parameters during multi-operation wall thinning drawing through several dies having wedge-shaped along the perimeter of the die bearing, which allow for intensive plastic deformation with significant shear deformations and finegrained structure of the finished part. The power modes of the process are analyzed. Dependencies are obtained, allowing to establish the effect of the geometric parameters of the tool and technological factors on the force of the studied drawing at different runs.

Keywords: drawing; intensive deformations; force; shaping; plastic metal working.

В последнее время актуален вопрос изготовления деталей, характеристики которых обеспечивали бы их эксплуатацию в сложных условиях. Этого можно добиться, например, формированием мелкозернистой структуры. Известно много методов формирования заданной структуры методами интенсивного деформирования и в частности интенсивной пластической деформацией (ИПД) [1, 2].

Основными процессами, при которых реализуется (ИПД), являются кручение, всесторонняя ковка, равноканальное угловое прессование и т.д. Структурообразование данными методами осуществляется в результате многократных формоизменений деформируемых металлов с образованием мелкозернистой структуры.

В машиностроении для получения тонкостенных цилиндрических оболочек с толстым дном широкое применение находит многооперационная вытяжка с утонением. Для повышения качества таких оболочек возможно использование многооперационной вытяжки с локальным пластическим деформированием [3—6]. При расчете силовых параметров вытяжки с локальным пластическим деформированием (ЛПД) на первой операции предложена методика [1, 2], по которой можно найти подход к определению силовых режимов при вытяжке с локальной деформацией на второй и последующих операциях.

На рис. 1 приведена схема профиля инструмента на первом и втором переходах. Рабочий



Рис. 1. Схема профиля инструмента на первом (1) и втором (2) переходах

^{*} Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-48-710002 р_а и гранта администрации Тульской области ДС/105.

профиль инструмента представляет собой совокупность выступов и впадин конической формы. Заштрихованная область соответствует площади металла, вытесняемого после второй вытяжки.

В ходе процесса наружная поверхность заготовки будет изменять форму в соответствии с формой рабочей кромки матрицы. Ввиду того, что рабочая кромка матрицы имеет определенный профиль, при формоизменении будут реализовываться локальные деформации и формирование дополнительных сдвиговых деформаций, что приведет к изменению схемы деформированного состояния с плоского на объемное. Это необходимо учитывать при определении силовых режимов операции.

Для создания методики определения силы процесса на первой операции P_1 необходимо знать площади поперечных сечений полуфабриката после первой F_1 и второй F_2 вытяжки [2].

Площадь поперечного сечения *F*₁ полуфабриката после первой операции вычисляли по формуле:

$$F_{1} = \pi \left(R^{2} - r_{\pi}^{2}\right) - RN \left\{ \sin \frac{\pi}{N} \left[R - r_{B} - R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{N}\right)^{2}}\right) \right] + (1) + R \left(\frac{\pi}{N} - \sin \frac{\pi}{N} \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{N}\right)^{2}}\right) \right\},$$

где R — радиус заготовки по вершине выступа; $r_{\rm n}$ — радиус пуансона; N — число выступов матрицы, $r_{\rm b}$ — радиус заготовки по впадинам.

Сила на первой операции вытяжки:

 $P_1 = k_1 F_1 a_1 c_1,$

где k_1 — уточняющий коэффициент; a_1 — удельная работа деформации; c_1 — составляющая, учитывающая влияние трения по пуансону и матрице.

Для определения силы на второй операции вытяжки в момент формоизменения стенки полуфабриката вычисляют площади поперечного сечения полуфабриката после второй вытяжки F_2 . В этом случае необходимо из площади полуфабриката первой вытяжки F_1 вычесть площади локальных участков $F_{\rm T}$ контакта выступов второй матрицы с выступами наружной поверхности полуфабриката первой вытяжки:

$$F_2 = F_1 - F_{\rm T},$$

где

$$F_{\rm T} = \left(R - r_{\rm B}\right)^2 \frac{\sin\frac{\beta}{2} \times \sin\frac{\gamma}{2}}{\sin\left(\pi - \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma}{2}\right)}N,\tag{2}$$

где β — угол вершин; γ — угол впадин.

Сила на второй операции вытяжки при формоизменении стенки полуфабриката:

$$P_2 = k_2 F_2 a_2 c_2, (3)$$

где

 $c_2 = 1 + \mu_{\rm M} (1 - r_2) (1 + \operatorname{ctg} \alpha) + 0,75 r_2 \mu_{\rm H} \operatorname{ctg} \alpha,$

где $\mu_{\rm M}$, $\mu_{\rm II}$ — коэффициенты трения по матрице и пуансону соответственно; α — угол конусности матрицы;

$$r_{2} = 1 - \frac{F_{2}}{F_{1}}; \ a_{2} = A(\varepsilon)^{1+n};$$
$$A = \frac{\sigma_{\rm B}}{1+n} \left(\frac{2,718}{n}\right)^{n}; \ n = \ln\left(1 + \frac{2\delta_{10} - \delta_{5}}{100}\right),$$

где $\sigma_{\rm B}$ — предел прочности материала заготовки; *n* — показатель степени; δ_{10} , δ_5 — относительные удлинения десяти- и пятикратного образца соответственно;

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\ln \frac{F_1}{F_2} \right].$$

На заключительной операции вытяжку проводят в матрице с цилиндрическим рабочим пояском, в результате чего происходит сглаживание наружной рифленой поверхности полуфабриката.

Силу вытяжки в этом случае определяют по зависимости

$$P_3 = k_3 F_3 a_3 c_3, (4)$$

где a_3 и c_3 находят аналогично предыдущим операциям: $F_3 = \pi (r_B^2 - r_\Pi^2)$.

Проведены расчеты по данным зависимостям для материала заготовки — сталь 10, предел прочности $\sigma_{\rm B} = 372$ МПа, предел текучести $\sigma_{\rm T} = 205$ МПа, относительное удлинение $\delta = 34$ %. Использовали заготовку — колпачок с наружным диаметром 36 мм и толщиной стенки 3 мм. На первой операции вытяжку с утонением осуществляли через матрицу с 16 выступами клиновой формы (на рабочем пояске), высотой 2 мм. После вытяжки получался полуфабрикат с рифленой наружной поверхностью и корончатым краем.

На второй операции вытяжки полуфабрикат подвергался формоизменению в этой же матрице, при этом он ориентировался рифлеными выступами по клиновым выступам рабочего пояска матрицы.

На третьей операции полуфабрикат второй вытяжки формоизменялся в матрице с гладким рабочим пояском. В результате этого наружная поверхность детали стала гладкой.

Таким образом, на всех трех операциях вытяжки осуществлялось локальное формоизменение заготовки.

В результате моделирования в программном комплексе QForm получены зависимости удельное давление—путь (рис. 2). Используя полученные данные, были установлены значения требуемых коэффициентов k_i . Для первой вытяжки: $k_1 = 1,2$; для второй: $k_2 = 1,5$; для третьей: $k_3 = 1,8$.

Расчет силовых параметров с учетом влияния возникновения дополнительных сдвиговых деформаций при вытяжке в матрице с клиновидными выступами на рабочем пояске с использованием известной методики расчета и результаты математического моделирования силовых параметров на всех трех операциях вытяжки с утонением и ИПД показали необходимость введения поправочных коэффициентов, которые учитывают возникновение дополнительных сдвиговых деформаций. Сдвиговые деформации возрастают при многооперационной вытяжке и увеличива-







Рис. 3. Зависимость силы процесса P от числа выступов N на матрице на двух переходах

ются значения поправочных коэффициентов. Сила вытяжки максимальна на первой операции, так как формоизменение осуществляется при наибольшей степени деформации.

Также был выполнен анализ силовых режимов процесса. Получены зависимости, позволяющие установить влияние геометрических параметров инструмента и технологических факторов на силу исследуемой вытяжки на разных переходах.

На рис. 3 представлена зависимость силы процесса на двух переходах от числа выступов на матрице. Из рис. 3 видно, что с ростом числа выступов на матрице сила порвышается на всех переходах тождественно. С повышением числа выступов от 8 до 45 сила возрастает в 2,2 раза.

На рис. 4 приведена зависимость, позволяющая выявить влияние коэффициента вытяжки, относительной глубины выступа на силу вытяжки. С увеличением коэффициента вытяжки сила уменьшается. Например, с повышением коэффициента вытяжки от 0,6 до 0,8 сила снижается в среднем на 80 %. Минимальное влияние коэффициент вытяжки ока-







Рис. 5. Влияние коэффициента трения μ и относительного радиуса выступов $r_{\rm B}/h_{\rm B}$ на силу вытяжки P

зывает при относительной глубине выступа 0,9. С уменьшением относительной глубины выступа с 0,9 до 0,7 сила возрастает в 2,5 раза.

На рис. 5 показана зависимость влияния коэффициента трения и относительного радиуса выступов на силу процесса. С увеличением коэффициента трения сила возрастает: с повышением коэффициента трения от 0,1 до 0,5 сила увеличивается в 1,4 раза. С уменьшением относительного радиуса выступов с 1,0 до 0,5 сила снижается в 2,0 раза.

Полученные результаты позволяют рассчитать силы вытяжки при различных сочетаниях использования матриц с клиновыми выступами на рабочей поверхности и с гладкой рабочей поверхностью. Выявлено, что возникновение дополнительных сдвиговых деформаций позволяет создавать мелкозернистую структуру, повышая эксплуатационные характеристики готового изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / под общ. ред. С.С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.

2. **Яковлев С.С.** Определение силовых параметров при вытяжке с утонением и интенсивной пластической деформацией // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2017. Вып. 11. С. 212—218.

3. **Яковлев С.С., Трегубов В.И., Нечепуренко Ю.Г.** Глубокая вытяжка анизотропного упрочняющегося материала // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 4. С. 38—44.

4. **Mousavia A., Kunzeb T., Rochb T. et al.** Deep drawing process without lubrication — an adapted tool for a stable, economic and environmentally friendly process // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207. P. 48–53.

5. **Numerical** and experimental investigation of dry deep drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces / Jennifer Tennera, Kolja Andreasa, Adrian Radiusa, Marion Merklein // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207. P. 2245–2250.

6. A forging method for reduc-ing process steps in the forming of automotive fasteners / Senyong Chena, Yi Qina, Chenb J.G., Chee-MunChoy // International Journal of Mechanical Sciences. 29 December 2017.

Сергей Николаевич Ларин, д-р техн. наук, mpf-tula@rambler.ru; Андрей Александрович Пасынков, канд. техн. наук; Юлия Вячеславовна Бессмертная, 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 С.П. Еронько¹, Е.Н. Смирнов², М.Ю. Ткачев¹, О.А. Ковалева¹ (¹ Донецкий национальный технический университет, ² Старооскольский технологический институт имени А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС")

Механические ножницы для качественной резки тонкостенных труб на заготовки

Описаны конструктивные особенности малогабаритных механических ножниц, обеспечивающих качественную резку тонкостенных труб без смятия их торцевых поверхностей, что достигается двухстадийным разделением на части полого профиля с предварительным выполнением на его наружной поверхности лыски, ослабляющей поперечное сечение, и последующим внедрением в месте надреза клинового ножа, осуществляющего полное отделение отмеренного отрезка.

Ключевые слова: тонкостенная труба; смятие торца; клиновой нож; сила резания; одноколенный вал; шатун; мощность двигателя.

The design features of small-sized mechanical shears, providing high-quality cutting of thin-walled pipes without crushing their end surfaces, which is achieved by two-stage separation into parts of the hollow profile with preliminary implementation on its outer surface of the pipe, weakening the cross section, and the subsequent introduction at the site of the incision of the wedge knife, carrying out complete separation of the measured segment are described.

Keywords: thin-walled tube; end crushing; wedge knife; cutting force; crank; connecting rod; engine power.

Одной из технологических операций, выполняемых на заготовительных участках машиностроительных предприятий, является разделение на мерные длины сортовых профилей, включая тонкостенные трубы. В большинстве случаев для этих целей применяют дисковые пилы или установки абразивной резки, что обусловлено стремлением исключить на торцевых частях металлического профиля смятий и заусенцев, поскольку их последующее удаление требует дополнительных материальных и временных затрат.

Однако порезка проката на заготовки быстровращающимися пилами и абразивными кругами сопровождается значительным шумовым эффектом и образованием большого количества раскаленных металлических и пылевых частиц, выбрасываемых в окружающее пространство, что требует принятия ряда защитных мер для соблюдения установленных санитарных норм в рабочей зоне. Разрушение зубьев или образование трещин в дисковой пиле, происходящие во время порезки фасонных профилей, представляют высокую опасность для работников цеха [1, 2].

В течение последнего десятилетия были выполнены научно-исследовательские и кон-

структорские разработки для создания образцов оборудования, позволяющего обеспечить качественную резку сортового проката на заготовки при меньших временных затратах и без ухудшения условий труда обслуживающего персонала. В ходе решения поставленных задач основное внимание уделено принятию новых технических решений, закладываемых в конструкцию режущих систем [3, 4], а также теоретическому обоснованию и экспериментальной проверке расчетных значений их энергосиловых параметров [5, 6].

Одно из перспективных направлений конструирования новых систем поперечной резки полых профилей — создание устройств, реализующих процесс их двухстадийного разделения на части (рис. 1), предполагающий предварительное выполнение подрезным ножом 1 на наружной поверхности профиля 2 лыски, ослабляющей его поперечное сечение, и внедрение в месте надреза клиновидного ножа 3, осуществляющего полное отделение отмеренного отрезка.

Результаты патентного поиска, проведенного для выявления оригинальных конструктивных решений, связанных с реализацией процесса резки полых профилей по указанной



Рис. 1. Схема двухстадийного процесса резки на части полого профиля (трубы)

схеме, свидетельствуют о том, что существующее многообразие заявленных ранее режущих систем данного класса обусловлено стремлением их разработчиков предложить кинематическую схему, которая позволила бы обеспечить синхронизацию функционирования входящих в их структуру механизмов при минимальных размерах взаимодействующих элементов [7, 8].

Авторами настоящей статьи на основании выполненного сопоставительного анализа преимуществ и недостатков известных аналогов разработана конструкция малогабаритных механических ножниц (рис. 2), предназначенных для поперечной резки тонкостенных труб малого и среднего диаметров без деформации их торцевых частей.

Ножницы включают станину 2 с внутренними направляющими, между которыми расположен суппорт 10, несущий клиновидный нож 3 и имеющий возможность вертикального перемещения с помощью электромеханического привода. Привод размещен на плитовине 5, жестко связанной с верхней частью станины 2, и включает одноколенный вал 6 с шатуном 4, тихоходную зубчатую передачу 17, двухступенчатый коническо-цилиндрический редуктор 8 и электродвигатель 7 постоянного тока. При этом колесо тихоходной зубчатой передачи является одной из щек одноколенного вала, а шатун 4 соединен с суппортом 10 посредством шарнира 9.

В нижней части станины установлены с зазором две пары ножей-зажимов *1* для фиксации трубы в момент ее надреза горизонтально движущимся ножом. Смыкание ножейзажимов 1 обеспечивается двумя клиньями 11, прикрепленными своей верхней частью к суппорту 10. Требуемая последовательность взаимодействия между механизмом, обеспечивающим предварительный надрез трубы, и механизмом ее разделения на части реализована за счет двух вертикальных 12 и одной горизонтальной 13 зубчатых реек, находящихся в зацеплении с размещенными на одном валу 14зубчатыми колесами 15 и 16 с различными диаметрами делительных окружностей, соотносящимися между собой так, что скорость горизонтальной зубчатой рейки 13 превышает скорость движения вертикальных реек 12в 1,5 раза.

Проектированию опытного образца ножниц предложенной конструкции предшествовала разработка методики расчета энергосиловых параметров их режущего механизма. В соответствии с результатами ранее проведенных исследований [9, 10], силы, требуемые для выполнения лыски на поверхности тела трубы и ее разделения на части клиновидными ножами, можно рассчитать по классической формуле

$$P = k_1 k_2 k_3 \sigma_{\rm B} F_{\rm pes}, \qquad (1)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий отношение максимального сопротивления срезу к пределу прочности; k_2 — коэффициент, учитывающий увеличение силы резания при затуплении ножей; k_3 — коэффициент, учитывающий увеличение силы резания из-за наличия бокового зазора между ножами; $\sigma_{\rm B}$ — предел прочности материала разрезаемой трубы, МПа; $F_{\rm pe3}$ — общая площадь сечения трубы в момент начала сдвига металла, мм².

При этом на основании практических данных рекомендуется принимать следующие значения приведенных коэффициентов: $k_1 = 0,6...0,7; k_2 = 1,15...1,25; k_3 = 1,2...1,3.$

В процессе разделения трубы клиновидным ножом сопротивление сдвигу оказывает не вся площадь ее поперечного сечения, а только часть, форма и размеры которой при одинаковом перемещении режущих кромок постоянно изменяются.

Для нахождения площадей сечения трубы, подверженных сдвигу при переходе горизонтального и вертикального режущих ножей из одного положения в следующее, использовали одну из функций САПР "КОМПАС",



которая позволяет с высокой точностью получить нужную расчетную информацию при любых диаметрах труб с различными толщинами стенок и заданных толщине и ширине режущего инструмента.

По полученным текущим значениям площади срезаемого сечения трубы с использованием зависимости (1) рассчитали соответствующие силовые нагрузки, преодолеваемые приводом ножниц в процессе выполнения надреза и окончательного разделения на части полого профиля при соответствующих положениях обоих ножей с учетом угла поворота одноколенного вала.

Затем на построенной в масштабе кинематической схеме ножниц для характерных положений вала измерили плечи сил, передаваемых шатуном, а текущие значения крутящего момента, преодолеваемого приводом

Размеры сечения трубы, мм		Максимальная	Максимальный момент	Эквивалентный	Мощность электродвигателя,
D	S	сила реза, п	на коленвале, Н.м	момент, п.м	кВт
	1,0	4300	163	95	0,18
10	1,5	8300	315	185	0,35
	2,0	11 200	425	250	0,47
	1	7200	273	160	0,3
20	2	12 000	456	265	0,5
	3	15 000	570	330	0,62
	1	9000	372	215	0,4
30	2	14 000	532	310	0,58
	3	17 000	640	375	0,7
Примечан	ние. Угловая си	корость коленвала 1,5	рад/с.		

Расчетные значения энергосиловых параметров режущего механизма экспериментального образца ножниц

режущего механизма ножниц при разделении на части труб различного диаметра, получили умножением соответствующих значений сил и их плеч (см. таблицу).

Для проверки правильности технических решений, принятых при конструировании малогабаритных ножниц, и оценки корректности зависимости, позволившей рассчитать значения энергосиловых параметров их режущего механизма, изготовили экспериментальный



Рис. 3. Экспериментальный образец ножниц для лабораторных исследований энергосиловых параметров процесса качественной резки тонкостенных труб

образец исследуемой системы (рис. 3), реализующей двухстадийный процесс разделения на мерные длины сварной трубы диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм.

В соответствии с планом лабораторных исследований на данных ножницах предполагалось осуществить контроль значений момента сопротивления, преодолеваемого электрическим приводом механизма реза при заданных условиях их функционирования. Для этого подготовили контрольно-измерительный комплекс, который включал в себя специальный тензорезисторный преобразователь, усилитель переменного тока и аналого-цифровой преобразователь фирмы L-CARD, плата которого устанавливается на шине ISA IBM, совместимой ПЭВМ.

Тензорезисторный преобразователь выполнен в виде гильзы, установленной на подшипниках скольжения в металлическую коробку с прозрачной передней стенкой. На поверхность гильзы наклеены тензорезисторные датчики под углом 45° к ее продольной оси, включенные по мостовой схеме. При этом тензорезисторы, измеряющие одинаковую по знаку деформацию растяжения или сжатия, расположены в противоположных плечах моста, а разную — в смежных.

Для снятия электрического сигнала с измерительной диагонали моста сопротивления и подключения к нему источника питания на гильзе установлены изолированные от корпуса медные кольца, контактирующие своей внешней поверхностью с токопроводящими шинами, концы которых соединены с разъемом, встроенным в боковую стенку коробки. При этом тензорезисторный преобразователь выполнял функцию муфты, передающей крутящий момент от вала двигателя к быстроходному валу двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора (рис. 4).

Перед началом лабораторного эксперимента осуществили тарировку преобразователя, по данным которой построили график тарировочной зависимости и оценили погрешность изменений, составлявшую 10 %.

При проведении опыта выполнили порезку стальной трубки диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм в следующей последовательности. Предварительно суппорт ножниц переводили в крайнее верхнее положение, трубку размещали в калибрах разведенных ножей-зажимов и подавали электропитание к приборам контрольно-измерительного комплекса. После выполнения балансировки моста сопротивлений тензорезисторного преобразователя включали измерительную систему в режим записи сигнала и запускали привод механизма реза ножниц, контролируя в режиме реального времени по монитору ЭВМ форму сигнала, регистрируемого в различные периоды процесса разделения трубы на две части. По окончании реза привод перемещения суппорта останавливали и осуществляли распечатку визуально отображенного на экране мо-



Рис. 4. Конструктивное исполнение и место установки тензорезисторного преобразователя для контроля крутящего момента, развиваемого приводом режущего механизма экспериментальных ножниц:

1 — электродвигатель; 2 — тензорезисторный преобразователь; 3 — одноколенный вал; 4 — тихоходная зубчатая передача; 5 — муфта; 6 — двухступенчатый коническоцилиндрический редуктор



Рис. 5. Вид торцевых поверхностей труб после разделения на части по одно- (а) и двухстадийной (б) схемам резки

нитора сигнала. В указанной последовательности на экспериментальном образце ножниц провели две серии опытов, выполнив порезку трубки указанного типоразмера по однои двухстадийной схемам разделения на части.

В первом случае горизонтальный нож, обеспечивающий предварительный надрез на поверхности трубки, исключали из работы изъятием из механизма горизонтальной зубчатой рейки. Для сравнения на рис. 5 приведены фотографии торцевых частей трубок, разрезанных по разным схемам.

В качестве характерного примера на рис. 6, *а* приведен график изменения крутящего момента на коленчатом валу $M_{\rm pac4}$ в зависимости от угла его поворота φ , построенный по расчетным данным для материала разрезаемой трубы $\sigma_{\rm B} = 340$ МПа, а на рис. 6, δ — зарегистрированный сигнал, отображающий изменение крутящего момента на валу приводного двигателя $M_{\rm per}$ за промежуток времени t = 4 с, соответствующий длительности реза трубы.

С учетом того, что общее передаточное число двухступенчатого редуктора и тихоходной зубчатой передачи $U_0 = 50$, максимальное значение крутящего момента на валу электродвигателя, определенное путем пересчета теоретического значения максимального момента на одноколенном валу, составляет 3,3 Н·м. Сопоставив это значение момента с максимальным измеренным значением (см. рис. 6, δ), получили разницу между ними 12 %, что допустимо для инженерной практики.

Заключение. Разработанные малогабаритные ножницы с механическим приводом, реализующие двухстадийный процесс разделения на части полых профилей круглого сечения, позволяют исключить смятие их торцевых поверхностей, что обеспечивает минимизацию потерь, вызываемых необходимостью последующего удаления деформированных концов тонкостенных труб.

Данные ножницы предназначены для применения на заготовительных участках машиностроительных предприятий, а также фабрик



Рис. 6. Изменение расчетных значений крутящего момента на одноколенном валу (*a*) и измеренных значений на валу двигателя (б) при порезке трубы диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм

по производству офисной мебели. Благодаря компактности, мобильности и автономности их удобно применять в местах проведения ремонтов систем трубопроводов. При этом следует отметить то, что разработанная система кроме двух клиновидных ножей должна дополнительно иметь комплекты сдвоенных ножейзажимов, строго соответствующих наружному диаметру разрезаемой тонкостенной трубы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров П.А. Оценка основных причин замены дисков пил горячей резки // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. 2006. Вып. 22. С. 173—179.

2. Петров П.А., Шпаков В.А., Павленко В.А. Исследование надежности пил горячей резки проката // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. науч. тр. 2007. Вып. 33. С. 201—208.

3. Стеблюк В.И., Савченко Д.Н., Шкарлута Д.Б. Последовательность резки тонкостенной трубчатой заготовки сдвигом вращающихся оправок // Вестник национального технического университета Украины "Харьковский политехнический институт": сб. науч. тр. 2010. № 43. С. 141—146.

4. Стеблюк В.И., Савченко Д.Н., Розов Ю.Г. и др. Экспериментальные исследования усовершенствованного метода резки трубчатых заготовок одновременным сдвигом и кручением // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: сб. науч. тр. 2010. № 1 (22). С. 179—182.

5. Боровик П.В., Петров П.А. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. № 2. С. 41—44.

6. Титов В.А., Савченко Д.М., Петришин А.И. Особенности расчета параметров процесса резки тонкостенных труб на детали и полуфабрикаты // World science. 2018. № 3 (31). С. 35-41.

7. **Brevet 3019481 France.** Dispositif coupe-tube / Numalliance Socit par action simplifie; publi 09.10.2015.

8. **Pat. 20170282263 USA.** Tubullar cutting apparatus / J.J. Khoury, L. Ortemond; published 05.10.2017.

9. Еронько С.П., Ошовская Е.В., Мечик С.В. и др. Теоретические и экспериментальные исследования силовых параметров процесса резки тонкостенных труб клиновыми ножами // Вестник Донецкого национального технического университета. 2016. № 5. С. 15—21. 10. Еронько С.П., Ткачев М.Ю., Ошовская Е.В. Ис-

10. Еронько С.П., Ткачев М.Ю., Ошовская Е.В. Исследование энергосиловых параметров ножниц для качественной резки тонкостенных труб // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. 2018. Вып. 11 (54). С. 110—118.

Сергей Петрович Еронько, д-р техн. наук; Евгений Николаевич Смирнов, д-р техн. наук, en_smirnov@i.ua; Михаил Юрьевич Ткачев, канд. техн. наук; Ольга Александровна Ковалева ПРОКАТНО-ВОЛОЧИЛЬНОЕ

ПРОИЗВОДСТВО

УДК 669.3

Н.Б. Абрамова (Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар)

Определение зависимости твердости от интенсивности деформации и температуры медных образцов для гильз кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок

Приведены экспериментальные исследования зависимости твердости от интенсивности деформации и температуры образцов из различных марок меди. Выполнена оценка моделей напряженного и деформированного состояний материала кованых труб-заготовок для гильз кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок. Определены исходные данные для построения математических моделей технологических процессов. Сделана проверка адекватности математических моделей.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок; гильзовые кристаллизаторы; кованые трубы-заготовки; твердость; интенсивность деформации.

Experimental studies of the hardness—deformation intensity and temperature relationship of samples from different grades of copper are presented. The models of the stress and strain states of the forged tubes-blanks material for mould tube of continuous casting machine is evaluated. The initial data for the building of mathematical models of technological processes are determined. Mathematical models verification is made.

Keywords: continuous casting machine; tubular moulds; forged tubes-blanks; hardness; strain intensity.

Качество машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в значительной степени связано с конструктивно-технологическими параметрами кристаллизаторов и их эксплуатационными характеристиками. Срок службы кристаллизатора предопределяет себестоимость конечного продукта. Одним из факторов, влияющих на срок службы кристаллизатора, является материал. В общей структуре издержек производства кристаллизаторов затраты на материал составляют около 60 %.

Наибольшее распространение получили *еильзовые кристаллизаторы* (ГК). Рабочим элементом гильзовых кристаллизаторов являются гильзы. По состоянию материал для ГК может быть твердым или мягким, литым и пластически деформированным: прессованным (трубы), катаным, тянутым (прокат, трубы) и т.п.

В России в качестве материалов ГК наибольшее распространение получили марки меди М1Р, М2Р. Использование сплавов меди, содержащих 0,08...0,12 % серебра и 0,06...0,012 % фосфора, обеспечивает высокую конкурентоспособность ГК. Однако серебросодержащая медь является дорогим материалом. Отечественными и зарубежными исследователями выдвинута гипотеза о возможном создании конкурентоспособных ГК из недорогих марок меди с применением соответствующих технологий [1].

Одним из альтернативных материалов ГК является бескислородная медь М-ЭЛП, полученная в печи электронно-лучевого переплава типа ЭЛП-30. В печи используется принцип переплава металла под глубоким вакуумом, используя энергию электронного луча.

Увеличение объема бескислородной меди свидетельствует о возрастающем интересе к этому материалу [1].

Для улучшения физико-механических свойств материалов применяют методы объемного деформирования. При мелкосерийном производстве целесообразно применять заготовки, кованные из слитка [2].

Для повышения износостойкости гильзы было принято решение использовать заготовку не из горячекатаного проката марки М1Р, как это делали традиционно, а из кованых труб марки М-ЭЛП [3].

Цель исследований — оценка параметров процессов ковки и эксплуатационных характеристик гильз кристаллизаторов, полученных по разработанной технологии, определение исходных данных для построения математических моделей технологических процессов и проверка адекватности математических моделей.

Оценку деформированного состояния кованых труб-заготовок для гильз кристаллизаторов проводили методом измерения твердости по Бринеллю, оптимального в условиях конкретного производства. В основу данного метода положена связь твердости с максимальной интенсивностью напряжений зависимостью, единой для различных напряженных состояний и теорий деформирования. Упругая разгрузка в случае циклического деформирования материала не приводит к изменению твердости. По результатам измерения твердости можно определять интенсивность напряжений в пластической области, а в предположении о единой кривой течения — и интенсивность деформаций. Данный метод не требует предварительного разрушения заготовок [4].

Твердость кованых труб-заготовок для гильз кристаллизаторов измеряли прибором Польди методом Бринелля, наиболее приемлемым при значительном градиенте деформаций в пластической зоне. Нагрузку на индентер выбирали таким образом, чтобы размер отпечатка значительно перекрывал размеры отпечатка значительно перекрывал размеры отпечатанных структурных составляющих. Нагрузка 2452 H, выдержка 30 с, диаметр шарика 5 мм. Отпечаток измеряли микроскопом МБП-2. Определяли среднее арифметическое в двух измерениях. По измеренному диаметру отпечатка, известной нагрузке и диаметру шарика твердость HB устанавливали по таблице согласно ГОСТ 9012 с округлением результатов до целого числа.

Твердость измеряли на диаметрально расположенных поверхностях трубы-заготовки в двух взаимно перпендикулярных направлениях, так как медь имеет большую анизотропию свойств.

Графики зависимости твердости от интенсивности деформации исследуемых материалов строили по результатам измерения твердости цилиндрических медных образцов, осаженных в условиях линейного напряженного состояния (рис. 1). Результаты измерений твердости образцов при изменении их температуры нагрева показаны на рис. 2.

Проверку однородности дисперсии опытных данных осуществляли по критерию Кохрена:

$$G \leq G_{\mathrm{KD}},$$
 (1)

где $G = \varpi_{i \max}^2 / \left(\sum_{i=1}^N \varpi_i^2 \right), \quad \varpi_{i \max}^2 = \max \varpi_i^2; \quad G_{\kappa p} -$

критическое значение G, определяемое из

таблицы работы [4]; $\varpi_{i \max}$ — несмещенная максимальная дисперсия; N — число опытов.

Установлено, что во всех опытах $G < G_{\kappa p}$, следовательно, дисперсии опытов однородны и опыты являются воспроизводимыми.

Ошибочные опытные данные выявляли на основании критерия Граббса:

$$\Theta_i < \Theta_{i \text{ KD}},$$
 (2)

где $\Theta_{i \text{ кр}}$ — критическое значение Θ_{i} , $\Theta_{i \text{ кр}} = \sqrt{nG_{\text{ кр}}};$ $\Theta_{i} = (y_{i \text{ max}} - y_{i})/\varpi_{i}$ или $\Theta_{i} = (y_{i} - y_{i \text{ min}})/\varpi_{i};$ ϖ_{i}^{2} — несмещенная дисперсия; y_{i} , $y_{i \text{ max}}$, $y_{i \text{ min}}$ —



Рис. 1. Зависимость твердости НВ от интенсивности деформации ε_i медных образцов:

1 — М1Р; *2* — М-ЭЛП; *3* — МС



Рис. 2. Зависимость твердости НВ от интенсивности деформации ε_i и температуры *Т* медных образцов: $1 - M-ЭЛП, \varepsilon_i = 0,82; 2 - M-ЭЛП, \varepsilon_i = 0,22; 3 - M-ЭЛП, \varepsilon_i = 0; 4 - M1P, \varepsilon_i = 0$

среднее, максимальное и минимальное значения наблюдения в *i*-м опыте; *n* — число повторных опытов.

Ошибочные данные в эксперименте не обнаружены, поскольку значения опытных данных не превышают $\Theta_{i \ KD}$.

Уравнение регрессии зависимости твердости НВ образцов от интенсивности деформации ε_i строили методом наименьших квадратов. Анализ корреляционной таблицы экспериментальных данных показал, что случайные значения НВ в заданном диапазоне изменения независимого параметра ε_i связаны линейной зависимостью:

$$HB = a\varepsilon_i + b. \tag{3}$$

Для вычисления параметров *a* и *b* составляли сумму квадратов отклонений опытных данных от расчетных значений в узловых точках, т.е. сумму квадратов "невязок". Сумма минимизировалась:

$$\Phi(a, b) = \sum (a\varepsilon_j + b - HB_j)^2 \to \min.$$
 (4)

Необходимое условие минимизации имеет вид:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \frac{\partial S}{\partial b} \quad \text{или}$$
$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2\sum \left(a\varepsilon_{j} + b - \text{HB}_{j}\right)\varepsilon_{j} = 0; \quad (5)$$
$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2\sum \left(a\varepsilon_{j} + b - \text{HB}_{j}\right) \cdot 1 = 0,$$

откуда получили систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} a\sum \varepsilon_j^2 + b\sum \varepsilon_j = \sum (\varepsilon_j HB_j) \\ a\sum \varepsilon_j + bN = \sum HB_j \end{cases},$$
(6)

где S — выборочное стандартное отклонение; HB_j — выборочное среднее случайного значения HB_{ij} в *j*-м опыте;

$$\mathbf{HB}_{j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \mathbf{HB}_{ij};$$

 ε_i — степень деформации образца в *j*-м опыте.

Решение системы (6) относительно *a* и *b* обеспечивает оптимальное расположение регрессионной линии в корреляционном поле:

$$a = \frac{N\sum(\varepsilon_{j} \operatorname{HB}_{j}) - \sum \varepsilon_{j} \sum \operatorname{HB}_{j}}{N\sum \varepsilon_{j}^{2} - (\sum \varepsilon_{j})^{2}}; \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum \varepsilon_j^2 \sum \mathbf{H} \mathbf{B}_j - \sum \varepsilon_j \sum (\varepsilon_j \mathbf{H} \mathbf{B}_j)}{N \sum \varepsilon_j^2 - (\sum \varepsilon_j)^2}.$$
 (8)

Полученные уравнения регрессии имеют вид: для меди М—ЭЛП

$$HB = 42 \varepsilon_i + 80,75;$$
 (9)

для меди М1Р

$$HB = 46 \epsilon_i + 84,66;$$
(10)

для меди МС

$$HB = 38 \varepsilon_i + 73,24.$$
(11)

Доверительный интервал случайной величины HB_{ij} в каждом опыте оценивали с вероятностью накрытия $\alpha = 0.95$:

$$\mathbf{HB}_{j} - \xi < \mathbf{HB}_{ij} < \mathbf{HB}_{j} + \xi, \tag{12}$$

где *ξ* — точность накрытия.

В соответствии с распределением Стьюдента точность накрытия определяли по формуле

$$\xi = tS/\sqrt{n},\tag{13}$$

где *t* — параметр распределения Стьюдента; выборочное стандартное отклонение:

$$S^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (HB_{ij} - HB_{j})^{2}}{n-1}.$$
 (14)

Заключение. В результате исследований установлены зависимости твердости HB от интенсивности деформации ε_i и температуры *T* медных образцов, построены уравнения регрессии зависимости твердости HB материала от интенсивности деформации ε_i . Эксперименты показали, что медные гильзы кристаллизаторов имеют максимальную стойкость при интенсивности деформации стенки в диапазоне 0,3...0,4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Осинцев О.Е., Федоров В.Н.** Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.

2. Сторожев М.В., Середин П.И., Кирсанова С.Б. Технология ковки и горячей штамповки цветных металлов и сплавов. М.: Высшая школа, 1967. 351 с.

3. Пат. 2228815 РФ, МПК⁷ В 21 К 21/06, В 22 Д 11/04. Способ изготовления медных гильз для кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок / Н.Б. Абрамова. № 2002116285/02; заявл. 17.06.2002; опубл. 20.05.2004, Бюл. № 14.

4. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.

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



МАТЕРИАЛЫ

УДК 669.1.08.29:621.785

Д.А. Романов¹, С.В. Московский¹, К.В. Соснин¹, В.Е. Громов¹, Ю.Ф. Иванов², А.Д. Филяков¹, Е.В. Протопопов¹ (¹Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, ²Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск)

Повышение свойств медного электрического контакта за счет его обработки плазмой, сформированной при электрическом взрыве фольги серебра с навеской порошка оксида цинка*

На поверхности медного электрического контакта электромагнитного пускателя СJ20 впервые получены электроэрозионно стойкие покрытия системы ZnO-Ag. Формирование покрытий системы ZnO–Ag проведено обработкой поверхности электрического контакта плазмой, сформированной при электрическом взрыве фольги серебра с навеской порошка оксида цинка. Исследованы нанотвердость. модуль Юнга, износостойкость, коэффициент трения и электроэрозионная стойкость сформированных покрытий. После электровзрывного напыления износостойкость модифицированного слоя увеличивается в ≈1,1 раза, а коэффициент трения при этом повышается в ≈1,3 раза по сравнению с отожженной медью. Нанотвердость напыленного покрытия в ≈3,8 раза больше твердости отожженной меди. Среднее значение модуля Юнга сформированного покрытия больше на 7 % по сравнению с серебром и в 1,46—1,73 раза меньше по сравнению с отожженной медью. По электроэрозионной стойкости покрытие соответствует требованиям стандартов. Исследовано электровзрывное покрытие системы ZnO—Ag методами сканирующей электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. Достижение высокого уровня эксплуатационных свойств электровзрыв-ного покрытия системы ZnO—Ag стало возможным благодаря его наноструктурированию. Структура покрытия образована ячейками высокоскоростной кристаллизации. Размер ячеек изменяется от 150 до 400 нм. Ячейки разделены прослойками второй фазы, толщина которых изменяется от 15 до 50 нм. Методом атомно-силовой микроскопии выявлены отдельные частицы ZnO различной формы размером 10...15 нм, хаотически расположенные в серебряной матрице, а также сферические частицы ZnO размером 2...5 нм. Общая толщина покрытия составляет 60 мкм.

Ключевые слова: композиционное покрытие; серебро; оксид цинка; структура; электроэрозионная стойкость; нанотвердость; модуль Юнга; износостойкость; коэффициент трения.

The electroerosion resistant coatings of ZnO–Ag system are obtained for the first time on the surface of the electrical contact of the electromagnetic starter CJ20. The formation of the coatings of ZnO–Ag system is produced due to the processing of the electrical contact surface by plasma formed at electrical explosion of silver foil with the weighed sample of ZnO powder. The nanohardness, Young's modulus, wear resistance, friction coefficient and electroerosion resistance of the formed coatings are studied. After the electroerosion spraying the wear resistance of the modified layer increases ≈ 1.3 - fold as compared to the annealed copper. The nanohardness of the sprayed coating is ≈ 3.8 - fold larger than that of the annealed copper. The average value of Young's modulus of the formed coating is larger by 7 % as compared to silver and is less by 1.46–1.73 times as compared with the annealed copper. By the electroerosion resistance the coating is consistent with the requirements of standards. The investigation into the electroexplosion coating of ZnO–Ag system was done by the methods of scanning electron microscopy, transmission electron microscopy and atomic-force microscopy. Due to the nanostructurization it became possible to reach the high level of the operation properties of the electroerosion coating of ZnO–Ag system. The cell dimensions vary within 150 to 400 nm. The cells are separated by the interlayers of the second phase whose thickness varies within 15 to 50 nm. The separate particles of ZnO of different shape with size of 10...15 nm located chaotically in the silver matrix as well as the spherical particles of ZnO with size of 2...5 nm are revealed by the method of atomic-force microscopy. The total thickness of the coating amounts to 60 nm.

Keywords: composite coating; silver; zinc oxide; structure; electroerosion resistance; nanohardness; Young's modulus; wear resistance; friction coefficient.

* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00013).

Введение. Как показывает мировой опыт, кризисные явления в странах в целом и в энергетике в частности отрицательным образом влияют на такой важный показатель энергетической эффективности передачи и распределения электроэнергии, как ее потери в электрических сетях [1, 2]. Характерным при этом является то, что зависимость роста потерь в сетях и кризиса экономики существует не только в России и странах СНГ, но и в других странах, вступивших в период перехода от централизованных к рыночным методам управления экономикой [3, 4].

Сверхнормативные потери электроэнергии в электрических сетях — это прямые финансовые убытки электросетевых компаний. Экономию от снижения потерь можно было бы направить на техническое переоснащение сетей; увеличение зарплаты персонала; совершенствование организации передачи и распределения электроэнергии; повышение надежности и качества электроснабжения потребителей; уменьшение тарифов на электроэнергию [5, 6].

Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях — сложная комплексная проблема, требующая значительных капитальных вложений, необходимых для оптимизации развития электрических сетей, совершенствования системы учета электроэнергии, внедрения новых информационных технологий в энергосбытовой деятельности и управления режимами сетей, обучения персонала и его оснащения средствами поверки средств измерений электроэнергии [7, 8].

Одной из причин потерь электрической энергии является ненадежный электрический контакт в различных выключателях и коммутационных аппаратах, прежде всего контактов переключателей мощных электрических сетей [9, 10]. В настоящее время все больше ученых интересует проблема создания защитных электроэрозионно стойких покрытий различных систем [11-14]. Применение таких покрытий позволит не только эффективно защищать электрические контакты [15], но и восстанавливать работоспособность контакта после выхода его из строя. Среди многочисленных композиций материалов, предназначенных для защиты электрических контактов особое место занимают композиции на основе системы ZnO-Ag [16].

Цель работы — формирование на поверхности медного электрического контакта электровзрывного покрытия системы ZnO—Ag, а также исследование его структуры, износостойкости, коэффициента трения, нанотвердости, модуля Юнга и электроэрозионной стойкости.

Методика проведения исследований. Объектом исследований являлись медные электрические

контакты электромагнитного пускателя СЈ20, на контактных поверхностях которых электровзрывным методом [17] было сформировано электровзрывное покрытие системы ZnO-Ag. В качестве взрываемого токопроводящего материала использовали фольгу серебра массой 250 мг, на поверхность которой в область взрыва помещали навеску порошка ZnO массой 80 мг. Время воздействия плазмы на поверхность образца ~100 мкс; поглощаемая плотность мощности на оси струи ~5,5 ГВт/м²; давление в ударносжатом слое вблизи облучаемой поверхности ~12.5 МПа: остаточное лавление газа в рабочей камере ~100 Па; температура плазмы на срезе сопла ~10⁴ К; толщина зоны термического влияния ≈50 мкм.

Элементный и фазовый составы, состояние дефектной субструктуры поверхностного слоя, сформированного в результате электровзрывного напыления (ЭВН), исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Carl Zeiss EVO50, оснащенный микроанализатором EDAX), просвечивающей дифракционной электронной микроскопии тонких фольг (прибор JEOL JEM-2100 F) и атомно-силовой микроскопии (прибор Solver NEXT). Фольги изготовляли методами ионного утонения пластинок, вырезанных в плоскости, расположенной перпендикулярно поверхности модифицирования.

Свойства материала характеризовали нанотвердостью и модулем Юнга (нанотвердомер DUH-211S (Shimadzu, Япония), нагрузка на индентор 30 мН).

Атомно-силовую микроскопию проводили в слое покрытия, расположенном на расстоянии 10 мкм от поверхности покрытия, а также на границе раздела между покрытием и медной подложкой.

Трибологические исследования (определение износостойкости и коэффициента трения) осуществляли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при следующих параметрах: шарик из твердого сплава ВК6 диаметром 6 мм; радиус трека — 3 мм; нагрузка на индентор 3 H; длина трека варьировалась в зависимости от уровня износостойкости исследуемого материала.

Испытания на электроэрозионную стойкость покрытий в условиях дуговой эрозии проводили на контактах электромагнитных пускателей марки CJ20 при переменном токе и индуктивной нагрузке в соответствии с требованиями режима испытаний AC-3 на коммутационную износостойкость при работе в трехфазной цепи со значением низкого напряжения 400/230 В, частотой 50 Гц для тока до 320 А и $\cos \varphi = 0.35$ и числе коммутационных циклов 6000.

R, мкОм

16

12

Результаты исследований и их обсуждение. Механические свойства модифицированного слоя меди характеризовали нанотвердостью. Нанотвердость и модуль Юнга определяли на поперечных шлифах, проводя индентирование вдоль прямой, расположенной параллельно поверхности модифицирования на расстоянии ≈15 мкм от поверхности обработки.

Результаты выполненных испытаний показали, что твердость электровзрывного покрытия изменяется от 750 до 2250 МПа при среднем значении твердости 1600 МПа, что в 3,8 раза превышает микротвердость отожженной меди [18]. Модуль Юнга электровзрывного покрытия увеличивается от 56,1 до 89,0 ГПа при среднем значении модуля 75,1 ГПа. Отметим, что модуль Юнга отожженной меди 110...130 ГПа, модуль Юнга серебра 80 ГПа [18].

ЭВН меди сопровождается незначительным (в ≈1,1 раза) увеличением износостойкости модифицированного слоя; коэффициент трения при этом повышается в ≈1,3 раза. Обращает на себя внимание изменение коэффициента трения в процессе трибологических испытаний (рис. 1): на начальной стадии испытаний коэффициент трения модифицированной поверхности (см. рис. 1, б) существенно ниже коэффициента трения исходной меди (см. рис. 1, а). Последнее может свидетельствовать о том, что упрочненный слой тонок и быстро теряет свои износостойкие свойства.

Проанализируем зависимость контактного сопротивления R от числа циклов включения/ отключения *N* при испытаниях покрытий системы ZnO-Ag на электроэрозионную стойкость в условиях дуговой эрозии (рис. 2). Первоначальные значения сопротивления для фаз L₁, L₂, L₃ равны 5,6; 3,2; 4,5 мкОм при числе циклов включения/отключения 134; 152; 213 соответственно. В дальнейшем функция сопротивления увеличивается.



Рис. 1. Зависимости коэффициента трения µ от времени трибологических испытаний t:

8 0 1000 2000 3000 4000 5000 Рис. 2. Зависимость контактного сопротивления R от числа циклов включения/отключения N при испытаниях покрытий системы ZnO-Ag на электроэрозионную стойкость в условиях дуговой эрозии

> Для фазы L₁ сопротивление возрастает от 5,6 до 9,2 мкОм при числе циклов включения/ отключения от 134 до 2178. Для фазы L₂ сопротивление повышается от 3,2 до 6 мкОм при числе циклов включения/отключения от 152 до 2134. Для фазы L₃ сопротивление увеличивается от 4,5 до 8,2 мкОм при числе циклов включения/ отключения от 213 до 1883.

> Далее наблюдается падение сопротивления. Для фаз L₁, L₂, L₃ сопротивление снижается до 6,3; 5,4; 4,7 мкОм при числе циклов 3002; 3145; 3211 соответственно.

> Затем показатель сопротивления снова растет и достигает максимального значения. Для фаз L_1, L_2, L_3 сопротивление возрастает до 14,1; 12; 13 мкОм при числе циклов 3990; 4123; 4207 соответственно. Это свидетельствует о том, что на настоящем этапе эксперимента начинается интенсивное испарение легкоплавкой серебряной матрицы под воздействием электрической дуги. Поверхность контакта обогащается частицами порошка ZnO, обладающего меньшей электро-

проводностью (10⁻⁸ См/м) по сравнению с серебром (62,5 МСм/м) [19]. По этой причине увеличивается контактное сопротивление на этом участке графика.

В конце испытаний значения сопротивления для фаз L₁, L₂, L₃ равны 6,3; 4; 5,7 при числе циклов включения/отключения 5997; 5983; 6123 соответственно.

Испытания показали, что сформированные покрытия системы ZnO-Ag удовлетворяют испытаниям пускателей на коммутационную износостойкость [20].

Контакты марки СЈ20 должны обеспечить не только длительную работу без недопустимого перегрева в условиях нормального режима, но также

а — медь без обработки; *б* — медь с покрытием ZnO—Ag

6000 N



Рис. 3. Структуры поперечного шлифа медного электрического контакта, подвергнутого электровзрывному напылению:

a — общий вид покрытия; δ — структура, формирующаяся на границе покрытия с подложкой; s — электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя; 1 — поверхностный слой; 2 — переходный слой; 3 — слой термического влияния

и требуемую термическую и электродинамическую стойкость в режиме короткого замыкания. Подвижные размыкаемые контакты не должны также разрушаться под действием высокой температуры электрической дуги, которая образуется при их размыкании, и надежно замыкаться без приваривания и оплавления при включении на короткое замыкание.

Работа данных электрических контактов состоит из 4 этапов — разомкнутое состояние, замыкание, замкнутое состояние и размыкание, каждый из которых оказывает влияние на надежность контактирования. В разомкнутом состоянии на электрический контакт воздействует внешняя среда и в результате на их поверхности образуются пленки. В замкнутом состоянии, когда контакты прижаты друг к другу и через них проходит ток, они разогреваются и деформируются; при некоторых условиях, если контакты перегреются, может наступить сваривание. При замыкании и размыкании контактов происходят мостиковые или разрядные явления, сопровождающиеся испарением и переносом металла контакта, изменяющим его поверхность. Возможен механический износ контактов в результате ударов и скольжения друг по другу.

Таким образом, повышение электрического сопротивления в ходе испытаний электровзрывных покрытий системы ZnO—Ag на коммутационную износостойкость вызвано испарением легкоплавкой серебряной матрицы под воздействием электрической дуги и обогащением поверхности покрытия частицами ZnO. Электрические контакты, упрочненные электровзрывными покрытиями системы ZnO—Ag, способны к механической очистке поверхности от частиц ZnO. Сформированные покрытия системы ZnO—Ag удовлетворяют испытаниям пускателей на коммутационную износостойкость.

Дефектную субструктуру электровзрывного покрытия системы ZnO—Ag изучали путем ана-

лиза поперечных травленных шлифов (рис. 3). Установлено, что ЭВН меди сопровождается формированием многослойной структуры. Толщина поверхностного слоя (см. рис. 3, *a*, слой *1*), имеющего субмикрокристаллическую (150...230 нм) структуру (см. рис. 3, *в*), изменяется в широких пределах и варьируется от 30 до 60 мкм. Поверхностный слой отделен от слоя термического влияния переходным слоем толщиной 1,0...1,3 мкм (см. рис. 3, *б*, слой *2*). Переходный слой содержит большое количество микропор (см. рис. 3, *a*, *б*).

Методами микрорентгеноспектрального анализа выполнены исследования элементного состава модифицированного слоя медного электрического контакта. Результаты исследований, представленные на рис. 4 (см. обложку), свидетельствуют о том, что серебро является основным элементом поверхностного слоя. В переходном слое концентрация атомов серебра быстро снижается и в основном объеме медного электрического контакта атомы серебра обнаружены в минимальном количестве.

Фазовый и элементный составы, состояние дефектной субструктуры медного электрического контакта, подвергнутого ЭВН покрытия системы ZnO-Ag, анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Исследования показали, что в поверхностном слое толщиной до 60 мкм формируется, независимо от расстояния до поверхности облучения, структура высокоскоростной ячеистой кристаллизации, характерные электронно-микроскопические изображения которой приведены на рис. 5, а, б. Ячейки имеют округлую форму (см. рис. 5, а). Размер ячеек изменяется от 150 до 400 нм. Ячейки разделены прослойками (см. рис. 5, б) толщиной 15...50 нм. В объеме ячеек выявляется дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций (см. рис. 5, б). Скалярная плотность дислокаций $\approx 2.1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.



Рис. 5. ПЭМ-структура электровзрывного покрытия системы ZnO-Ag, полученного на медном электрическом контакте:

а, б — поверхностный слой; *в* — переходный слой; *г* — слой термического влияния

Переходный слой имеет структуру дендритной кристаллизации со стороны слоя электровзрывного напыления (рис. 5, e, слой I) и структуру пластинчатого типа со стороны слоя термического влияния (см. рис. 5, e, слой 2). Слой термического влияния медного электрического контакта имеет зеренно-субзеренную структуру (рис. 5, e). В объеме зерен меди наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций (см. рис. 5, e). Скалярная плотность дислокаций составляет $\approx 1,3 \cdot 10^{10}$ см⁻². На электронно-микроскопического влияния присутствует большое количество изгибных

экстинкционных контуров [21] (см. рис. 5, *г*), что указывает на высокий уровень кривизныкручения материала, обусловленный внутренними полями напряжений [22].

Распределение атомов серебра, цинка и кислорода в электровзрывном покрытии изучали методами микрорентгеноспектрального анализа тонких фолыг. Результаты исследований приведены на рис. 6 и 7 (см. обложку). Анализируя результаты, представленные на рис. 6, можно заключить, что в структуре высокоскоростной ячеистой кристаллизации, образующейся в поверхностном слое, объем ячеек сформирован преимущественно атомами серебра (см. рис. 6, δ), атомы цинка (см. рис. 6, θ) и кислорода (см. рис. 6, c) расположены преимущественно по границам ячеек, формируя протяженные прослойки.

относительное содержание атомов, формирующих поверхностный слой напыленного электровзрывного покрытия, приведено в табл. 1. Установлено, что основными элементами поверхностного слоя являются серебро, цинк и кислород, что и следовало ожидать.

В структуре переходного слоя (слоя с дендроидной кристаллизацией) атомы серебра и цинка располагаются преимущественно вдоль границ дендритов (см. рис. 7, *в*, *г*). В объеме зерен меди, формирующих зону термического влияния, атомы серебра и цинка методами микрорентгеноспектрального анализа выявлены в незначительном количестве.

Относительное содержание атомов, формирующих переходный слой электровзрывного покрытия системы ZnO—Ag, приведено в табл. 2. Анализируя результаты, представленные в табл. 2, можно отметить, что концентра-

1. Относительное содержание химических элементов в поверхностном слое электровзрывного покрытия системы ZnO—Ag (коэффициент подгонки 0,1921)

Dravour	E D	Содер	жание	V oguusempe	Погрешность, %	
Элемент	Е, КЭБ	% мас.	% ат.	количество		
Ag (L)	2,984	51,83	63,89	101 179,97	0.01	
Zn (K)	8,630	31,43	22,82	33 371,70	0,01	
O (K)	0,525	16,74	13,29	18 340,04	0,26	
Всего	—	100,00	100,00	—	—	

2. Относительное содержание химических элементов в переходном слое меди, модифицированной электровзрывным методом

D TOLYOUT	E voD	Содер	жание	Колицаатра	Погренциость %	
Элемент	<i>L</i> , кэ р	% мас.	% ат.	количество	погрешность, 70	
Cu (K)	8,040	86,84	91,4	179 363	0	
Ag (L)	2,984	8,6	5,33	9663,6	0.01	
Zn (K)	3,443	4,28	2,41	4812,1	0,01	
O (K)	0,525	0,28	0,86	595	0,61	
Всего	_	100	100	—	—	

ция атомов серебра и цинка в переходном слое существенно ниже, чем в поверхностном слое, что хорошо согласуется с результатами микрорентгеноспектрального анализа, полученными методами сканирующей электронной микроскопии (см. рис. 4).



Рис. 8. Структура покрытия системы ZnO—Ag, выявленная методом атомно-силовой микроскопии:

а — распределение неровностей рельефа по высоте
 в 3D-формате; δ — положение секущей (вид сверху);
 в — распределение неровности вдоль базовой длины



Рис. 9. Структура на границе покрытия ZnO—Ag с медной подложкой, выявленная методом атомно-силовой микроскопии: *a* — распределение неровностей рельефа по высоте в 3D-формате; *б* — положение секущей (вид сверху); *в* — распределение неровности вдоль базовой длины

Методом атомно-силовой микроскопии выявлены отдельные частицы ZnO различной формы размером 10...15 нм, хаотически расположенные в серебряной матрице (рис. 8, *a*). Обнаружены также сферические частицы ZnO размером 2...5 нм. Доли серебряной матрицы, крупных и мелких частиц ZnO в покрытии оценены как 60, 15 и 25 %. Неровность профиля покрытия составила 550,6 нм, а впадины — 300,5 нм. На границе раздела покрытие/подложка со стороны покрытия отмечены поверхностные периодические структуры со средним периодом 3 нм (рис. 9).

Полученные результаты позволяют предположить, что увеличение прочностных (нанотвердость) и трибологических (износостойкость) свойств и электроэрозионной стойкости медного электрического контакта, подвергнутого электровзрывному напылению покрытия системы ZnO—Ag, обусловлено формированием в поверхностном слое многоэлементного многофазного субмикро- и наноразмерного состояния, обогащенного атомами различных элементов.

Заключение. Показано, что напыление поверхности медного электрического контакта методами электрического взрыва проводящей серебряной фольги с расположенной на ее поверхности навеской порошка оксида цинка сопровождается увеличением износостойкости модифицированного слоя в $\approx 1,1$ раза; коэффициент трения при этом повышается в $\approx 1,3$ раза. Установлено, что нанотвердость напыленного покрытия в $\approx 3,8$ раза больше твердости отожженной меди.

Выявлено, что электровзрывное напыление медного электрического контакта сопровождается формированием многослойной структуры общей толщиной до 60 мкм. В поверхностном слое, независимо от расстояния до поверхности модифицирования, формируется структура высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Размер ячеек изменяется от 150 до 400 нм. Ячейки разделены прослойками второй фазы, толщина которых составляет 15...50 нм. Показано, что переходный слой имеет структуру дендритной кристаллизации со стороны поверхностного слоя и структуру пластинчатого типа со стороны слоя термического влияния. Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что объем ячеек структуры поверхностного слоя обогащен атомами серебра, атомы цинка и кислорода расположены преимущественно в прослойках по границам ячеек.

Сделано предположение, что увеличение прочностных (нанотвердость) и трибологических (износостойкость) свойств и электроэрозионной стойкости медного электрического контакта, подвергнутого электровзрывному напылению покрытия системы ZnO—Ag, обусловлено формированием в поверхностном слое многоэлементной многофазной субмикро- и наноразмерной структуры. Использование такого покрытия позволяет увеличить ресурс работы медных электрических контактов вдвое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Voltage quality in delta Egypt network and its impact in oil industry / M.A. Omara, I.A. Nassar // Energy Reports. 2019. Vol. 5. P. 29–36.

2. **State-of-the-art** of hosting capacity in modern power systems with distributed generation / S.M. Ismael, Abdel S.H.E. Aleem, A.Y. Abdelaziz et al. // Renewable Energy. 2019. Vol. 130. P. 1002–1020.

3. **The impact** of wind power growth and hydrological uncertainty on financial losses from oversupply events in hydropower-dominated systems / Y. Su, J.D. Kern, G.W. Characklis // Applied Energy. 2017. Vol. 194. P. 172–183.

4. **Decentralized** Grid-connected Power Generation Potential in India: From Perspective of Energy Efficient Buildings / R. Joshi, M. Pathak // Energy Procedia. 2014. Vol. 57. P. 716–724.

5. **The impact** of a feed-in tariff on wind power development in Germany / C. Hitaj, A. Löschel // Resource and Energy Economics. 2019. Vol. 57. P. 18–35.

6. **Regulated** electricity networks, investment mistakes in retrospect and stranded assets under uncertainty / P. Simshauser, A. Akimov // Energy Economics. 2019. Vol. 8. P. 117–133.

7. **Optimal** sizing of grid-connected photovoltaic battery systems for residential houses in Australia / J. Li // Renewable Energy. 2019. Vol. 136. P. 1245–1254.

8. **Potential** impacts of residential PV and battery storage on Australia's electricity networks under different tariffs / S. Young, A. Bruce, I. Mac Gill // Energy Policy. 2019. Vol. 128. P. 616–627.

9. Failure analysis of arc ablated tungsten-copper electrical contacts / Y.X. Zhou, Y.L. Xue, K. Zhou // Vacuum. 2019. Vol. 164. P. 390–395.

10. **Robust**, Cheap and Efficient Vision System for Mechanical Thermostat Switch Sub-assembly Inspection / J. Rejc // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2019. Vol. 20. P. 67–78.

11. **Electroerosion** resistance and structural phase transformations in electrospark and laser deposition of titanium alloys using composite ceramics based on ZrB_2 - $ZrSi_2$ and TiN- Cr_3C_2 systems / I.A. Podchernyaeva, A.D. Panasyuk, V.M. Panashenko et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2008. Vol. 47. P. 116–123.

12. **Experimental** investigations on the durability of tool-electrodes at the surface processing by pulsed electrical

discharge / N. Pinzaru // International Journal of Modern Manufacturing Technologies. 2017. Vol. 9. P. 59–64.

13. **Precipitation-Strengthened** and Microlayered Bulk Copper- and Molybdenum-Based Nanocrystalline Materials Produced by High-Speed Electron-Beam Evaporation—Condensation in Vacuum: Structure and Phase Composition / N.I. Grechanyuk, V.G. Grechanyuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2018. Vol. 56. P. 633—646.

14. **Apour-phase** condensed composite materials basedon copper and carbon / V. Bukhanovsky, M. Rudnytsky, M. Grechanyuk et al. // Materials and technology. 2016. Vol. 50. P. 523–530.

15. **Structure** and electrical erosion resistance of an electro-explosive coating of the CuO–Ag system / D.A. Romanov, S.V. Moskovskii, K.V. Sosnin et al. // Materials and technology. 2019. Vol. 6. P. 055042.

16. **RF magnetron-sputtered** Al–ZnO/Ag/Al–ZnO (AAA) multilayer electrode for transparent and flexible thin-film heater / M.K. Roul, S.K. Pradhan, K.D. Song, M.J. Bahoura // Journal of Materials Science. 2019. Vol. 54. P. 7062–7071.

17. **Structural-phase** state of the system "CdO—Ag coating / copper substrate" formed by electroexplosive method / D.A. Romanov, S.V. Moskovskii, E.A. Martusevich et al. // Metalurgija. 2018. Vol. 57. P. 299—302.

18. **Effect** of encapsulation on electronic transport properties of nanoscale Cu(111) films / P.P. Shinde, S.P. Adiga, S. Pandian et al. // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. P. 3488.

19. **Conductive** silver inks and their applications in printed and flexible electronics / R. Venkata Krishna Rao, K. Venkata Abhinav, P.S. Karthik, Surya Prakash Singh // RSC Advances. 2015. Vol. 5. P. 77760–77790.

20. **Applicability** of Cu-Mo multilayers material in sliding contacts of DC mine transportation system / B. Miedzinski, M. Habrych, J. Wandzio, N. Grechanyuk // IET Conference Publications. 2012. Vol. 2012. P. 78-81.

21. **Contributions** of the lattice bending and torsion stresses to the plastic component of the internal stresses in a deformed austenitic steel / S.F. Kiseleva, N.A. Popova, N.A. Koneva, E.V. Kozlov // Russian Metallurgy (Metally). 2016. Vol. 2016. P. 895–898.

22. **Gradient** dislocation substructures at fracture of polycrystalline Cu–Mn alloys/N.A. Koneva, L.I. Trishkina, T.V. Cherkasova // Letters on Materials. 2018. Vol. 8. P. 435–439.

Денис Анатольевич Романов, д-р техн. наук, romanov_da@physics.sibsiu.ru;

Станислав Владимирович Московский;

Кирилл Валерьевич Соснин, канд. техн. наук;

Виктор Евгеньевич Громов, д-р физ.-мат. наук;

Юрий Фёдорович Иванов, д-р физ.-мат. наук;

Артём Дмитриевич Филяков; Евгений Валентинович Протопопов, д-р техн. наук

ИНФОРМАЦИЯ

Сварка. Гибридная лазерно-дуговая сварка сталей, никеля и никелевых сплавов. Уровни качества для дефектов по ГОСТ ISO 12932—2017. Продолжение*

1. Ограничения на дефекты

Nº	Обозначение по	Наиме- нование	Примечание 2. Внутренние ле		Примечание		Примечание		Ограничения на дефекты для различных уровней качества		
п/п	ISO 6520-1	дефекта			D	С	В				
			2. Внутренние де	фект	гы						
2.1	100	Трещина	Все типы трещин, за исключе- нием микротрещин и кратер- ных трещин			Не допускаются					
2.2	1001	Микро- трещина	Трещина, которая выявляет- ся только под микроскопом (×50)		Допускаются	Приемка зависи ного металла с тельности н	т от типа основ- учетом чувстви- к трещинам				
2.3	2011 2012	Газовая пора Равномерная пористость	Должны выполняться следующие условия и ограничения для дефектов (рис. 3): 1) максимальный размер площади дефектов (включая систематический дефект), отнесенный к площади проекции. Примечание. Пористость на площади проекции зависит от количества слоев (объема сварного шва)		Для однослойного: ≤2,5 %, для многослойного: ≤5 %	Для однослойного: ≤ 1,5 %, для многослойного: ≤3%	Для однослойного: ≤1%, для многослойного: ≤2%				
			2) максимальный размер пло- щади поперечного сечения дефектов (включая система- тический дефект), отнесен- ный к площади разрушения (применимо только к произ- водству, аттестации сварщика или процедуре сварки)		≤2,5 %	≤1,5 %	≤1 %				
			 3) максимальный размер единичной газовой поры: – стыковые швы; – угловые швы 		<i>d</i> ≤ 0,5 <i>s</i> , но не более 5 мм; <i>d</i> ≤ 0,5 <i>a</i> , но не более 5 мм	$d \le 0,4s,$ но не более 4 мм; $d \le 0,4a,$ но не более 4 мм	$d \le 0,3s,$ но не более 3 мм; $d \le 0,3a,$ но не более 3 мм				

* Начало см. в № 10, 2019 г.

Продолжение табл. 1	суровней качества	В		≤4 %	$d \leq 0, 3s,$ но не более 2 мм; $d \leq 0, 3a,$ но не более 2 мм
	фекты для различных	С	1	⊗ 8 ⊗	$d \leq 0,4s,$ но не более 3 мм; $d \leq 0,4a,$ но не более 3 мм
	Ограничения на де	D		≤16 %	$d \leq 0,5s,$ Ho He Goree 4 MM; $d \leq 0,5a,$ Ho He Goree 4 MM
		<i>I</i> , MM	I		
-	Ē	примечание	Вариант 1 ($D > d_{A_2}$) $x = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & $	Должны выполняться следующие условия и ограничения для дефектов (см. рис. 3): 1) максимальный размер совокупной пло- щади дефектов (включая систематические дефекты);	 2) максимальный размер единичной поры: — стыковые швы; — угловые швы
-	Наименование	дефекта	Скопление пор		
	Обозначение	по ISO 6520-1	2013		
ĺ	z	п/п	4.		

ИНФОРМАЦИЯ

Продолжение табл. 1

	личных уровной качоства В			іного: Для однослойного: ≤2 %; йного: для многослойного: ≤4 %	≤2 %	d ≤ 0,3 <i>s</i> , чо че более 2 ми	MIMINI I THOUT VOULVE FINING I
оосони плафа		Ι		Для однослой Для однослой 4 %; 1ля многослой 8 %	≈ 4 %	$d \leqslant 0,4s,$ но не более 3	
	Отраничения на , D			Для однослойного: ≤8%; для многослойного ≤16%	% 8 ∛	$d \leqslant 0,5s,$ но не более 4 мм;	
	<i>t</i> , MM						
	Примечание	Bapuatr 1 ($D > d_2$): $ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Сумма площадей различных пор Сумма площадей различных пор $\frac{d_1^2 \pi}{4} + \frac{d_2^2 \pi}{4} +,$ расположенных на площади $l_p W_p$ (вариант 1). Если <i>D</i> меньше меньшего диаметра рас- положенных рядом пор, то объединенная площадь обеих пор должна включаться в сумму дефектов (вариант 2)	Должны выполняться следующие условия и ограничения для дефектов (см. рис. 3): 1) максимальный размер площади дефек- тов (включая систематический дефект), отнесенный к плошади проекции. При мечан ие. Пористость на площади проекции зависит от количества слоев (объема сварного шва)	2) максимальный размер площади по- перечного сечения дефектов (включая систематический дефект), отнесенный к плошади разрушения (применимо только к производству, аттестации сваршика или процедуре сварки)	 3) максимальный размер единичной газовой поры: — стыковые швы; 	
11	паименование дефекта	Линейная пористость					
	ооозначение по ISO 6520-1	2014					-
2	л/п	2.5					

ИНФОРМАЦИЯ

							Продолжение табл. 1
Š	Обозначение	Наименование	E		Ограничения на де	фекты для различны)	к уровней качества
ш/ш	по ISO 6520-1	дефекта	Примечание	<i>I</i> , MM	D	U	B
2.6	2015 2016	Вытянутая полость Свищ	— стыковые швы		$h \leq 0,5s$, но не более 4 мм; $l \leq s$, но не более 75 мм	$h \leq 0.4s$, но не более 3 мм; $l \leq s$, но не более 50 мм	$h \leq 0.3s$, но не более 2 мм; $l \leq s$, но не более 25 мм
			— угловые швы		$h \leq 0.5a$, Ho He 60.1ee 4 MM; $l \leq a$, Ho He 60.1ee 75 MM	$h \leq 0,4a$, Ho He 6onee 3 MM; $l \leq a$, Ho He 6onee 50 MM	<i>h</i> ≤ 0,3 <i>a</i> , Ho He 60лее 2 MM; <i>l</i> ≤ <i>a</i> , Ho He 60лее 25 MM
2.7	202	Усадочная раковина		≥ 0,5	Допускаются короткие дефекты, но не разрываю- щие поверхность – стыковые швы: h < 0,4s, но не более 4 мм; h < 0,4a, но не более 4 мм	Не донус	скаются
2.8	2024	Кратерная усадочная раковина	<i>y</i>	От 0,5 до 0,3	<i>h</i> или <i>l</i> < 0,2 <i>t</i>		
			→ / ← Измеряют большее значение <i>h</i> или <i>l</i>	>3	<i>h</i> или <i>l</i> < 0,2 <i>t</i> , но не более 2 мм		
2.9	300 301	Твердое включение Шлаковое включение	— стыковые швы		$h \leq 0,4s,$ но не более 4 мм; $l \leq s,$ но не более 75 мм	$h \leq 0,3s,$ но не более 3 мм; $l \leq s,$ но не более 50 мм	$h \leq 0, 2s,$ но не более 2 мм; $l \leq s,$ но не более 25 мм
	302 303	Флюсовое включение Оксидное включение	— угловые швы		$h \leq 0,4a$ но не более 4 мм; $l \leq a$, но не более 75 мм	$h \leq 0,3a,$ но не более 3 мм; $l \leq a,$ но не более 50 мм	$h \leq 0,2a,$ но не более 2 мм; $l \leq a,$ но не более 25 мм
2.10	304	Металлическое включение,	— стыковые швы		$h \leqslant 0,4s,$ но не более 4 мм	$h \leqslant 0, 3s,$ но не более 3 мм	$h \leqslant 0,2s,$ но не более 2 мм
		кроме меди	— угловые швы		$h \leqslant 0,4a,$ но не более 4 мм	$h \leqslant 0, 3a,$ но не более 3 мм	$h \leqslant 0,2a,$ но не более 2 мм
2.11	3042	Металлическое включение меди	Ι			Не допускаются	

Продолжение табл. 1	личных уровней качества	B		едопускаются							
	фекты для раз	С									
	Ограничения на де	D	Допускаются короткие дефекты, но не разрывающие поверхность: — стыковые швы: $h \leq 0,4s$, но не более 4 мм; — угловые швы: $h \leq 0,4a$, но не более 4 мм; Но не более 4 мм	Короткие дефекты: $h \leq 0,2a,$ но не более 2 мм Короткие дефекты: $h \leq 0,2t,$ но не более 2 мм							
	<i>t</i> , MM										
		примечание	W W	Тавровое соединение (угловой шов при низкой мощности лазера). Шов с неполным проваром – одно- сторонняя и двусторонняя сварка							
	Наименование	дефекта	Несплавление Несплавление по расплавляемой поверхности Несплавление между валиками корне сварного шва	Непровар							
	Обозначение	по ISO 6520-1	401 4011 4012 4013	402							
	õ	п/п	2.12	2.13							



Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Том 17. № 11

ИНФОРМАЦИЯ

MM OI PAHAY
I
- S
V
/ (

ИНФОРМАЦИЯ

Продолжение табл. 1

Ž	Обозначение	Наименование	Примечание	t. MM	ог раничсних на до	тратичны для различны.	х уровной качоства
п/п	по ISO 6520-1	дефекта			D	С	В
3.2	508	Уголовое смещение	g	I	β ≼ 4°	β ≼ 2°	β ≼ 1°
3.3	617	Неправильный зазор в корне угловых швов	Ограничение раздела 5, касающееся систе- матических дефектов, не применяется а	От 0,5 до 3	<i>h</i> ≤ 0,5 мм + 0,1 <i>a</i>	$h \leqslant 0,3 \text{ mm} + 0,1a$	$h \leqslant 0,2 \text{ mm} + 0,1a$
			Тавровое соединение (односторонняя сварка)	>3	<i>h</i> ≤ 1 мм + 0,3 <i>a</i> , но не более 4 мм	$h \leq 0,5$ мм + 0,2 a , но не более 3 мм	$h \leq 0,5$ мм + 0,1 a , но не более 2 мм
				От 0,5 до 3	$h \leqslant 0,5$ MM	$h \leqslant 0,3$ MM	$h \leqslant 0,2$ MM
			ат Саринение (двухсторонняя сварка)	>3	$h \leqslant 0,1$ mm	$h \leqslant 0,5$ MM	<i>h</i> ≼ 0,5 мм
			4. Множественные до	ефекты			
4.1	Нет	Множествен-	$\frac{\overline{\varepsilon} \frac{\psi}{1}}{\overline{\varepsilon} \frac{\psi}{z}}$	≪3		Не допускаются	
		ные дечекты в каком-либо поперечном сечении (см. рис. 3). Поперечное сечение (макло-	$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 = \sum h$		Максимальная общая высота дефектов: $\Sigma h \leq 0,4t$	Максимальная общая высота дефектов: $\Sigma h \leq 0, 3t$	Максимальная общая высота дефектов: $\Sigma h \leq 0, 2t$
		структура) в наиболее неблагоприят- ном диапазоне соединений	τų τų τų τų	>3	$\Sigma h \leqslant 0,25a$	$\Sigma h \leq 0, 2a$	$\Sigma h \leqslant 0,15a$
			$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 = \Sigma h$				

Продолжение табл. 1

ИНФОРМАЦИЯ

Окончание табл. 1	х уровней качества	В	$\Sigma h l \leqslant 4 \%$
	ефекты для различны	С	Σ <i>h</i> I ≤ 8 %
	Ограничения на д	D	<i>Σhl</i> ≤ 16 %
	, , , , ,	<i>t</i> , мм	Ι
	Пактористи	примечание	Bapuaur 1 ($D > I_3$) $x^{2} + \frac{l_1}{z} + \frac{l_1}{1} + h_2 l_2 + h_3 l_3 = \sum h l$ $h_1 l_1 + h_2 l_2 + h_3 l_3 = \sum h l$ Bapuaur 2 ($D < I_3$) $x^{2} + \frac{l_1}{z} + \frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2} + \frac{l_3}{2} = \sum h l$ $h_1 l_1 + h_2 l_2 + \left(\frac{h_2 + h_3}{2}\right) D + h_3 l_3 = \sum h l$ Cymy IIJOUIGALE MAINAAILHARA JIJIHAA JIAA JI
	Наименование дефекта		Площадь проекции или плошадь поверхности разрушения направлении направлении
	Обозначение	по ISO 6520-1	Her
	Š	п/п	4.2

. 1





a — пористость 1 %, 15 пор; δ — пористость 1,5 %, 23 поры; e — пористость 2 %, 30 пор; e — пористость 2,5 %, 38 пор; d — пористость 3 %, 45 пор; e — пористость 4 %, 61 пора; ∞ — пористость 5 %, 76 пор; 3 — пористость 16 %, 244 поры; u — пористость 8 %, 122 поры; a-u - d = 1 мм Дополнительная информация и указания по применению стандарта ГОСТ ISO 12932—2017. ГОСТ ISO 12932—2017 устанавливает требования для трех уровней качества в зависимости от дефектов сварных соединений стали, никеля и никелевых сплавов, произведенных по технологиям гибридной лазерно-дуговой сварки, для толщины сварного шва ≥0,5 мм. Этот стандарт может применяться (где это возможно) и для других процессов сварки плавлением и толщин сварного шва.

Изделия производятся разного назначения, но соответствуют сходным требованиям. Должны применяться одинаковые требования для идентичных изделий, произведенных на разных производствах, для обеспечения выполнения работы по одинаковым критериям. Последовательное применение настоящего стандарта является одним из основных принципов системы обеспечения качества при производстве сварных конструкций.

При суммировании множественных дефектов существует теоретическая возможность того, что отдельные дефекты могут взаимно накладываться. В этом случае сумма всех допускаемых отклонений должна быть ограничена величинами, указанными для различных дефектов, т.е. ограничение на единичный дефект $\leq h$, например единичную пору, не должно превышаться.

ГОСТ ISO 12932-2017 стандарт можно применять вместе с каталогом реальных иллюстраций, показывающих размеры приемлемых дефектов для различных уровней качества посредством фотографий, показывающих переднюю и корневую стороны и/или репродукций рентгенограмм и фотографий макроструктуры поперечного сечения сварного шва. Примером такого каталога является Reference radiographs for the assessment of weld imperfections according to ISO 5817. Villepinte: International Institute of Welding (IIW); Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS), 2005 [Справочные рентгенограммы для оценки дефектов сварных швов в соответствии с ISO 5817. Опубликованы Международным Институтом Сварки (МИС), 2005]. Этот каталог можно использовать со справочными картами для оценки различных дефектов и когда мнения о допустимом размере дефекта расхолятся.

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам приведены в табл. 2.

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего межгосударственного стандарта
ISO 2553		*, 1)
ISO 5817:2003	_	*, 2)
ISO 6520-1		*, 3)

2. Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам

* Соответствующий межгосударственный стандарт отсутствует. До его утверждения рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта. Перевод данного международного стандарта находится в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

¹⁾ В Российской Федерации действует ГОСТ Р ИСО 2553 "Сварка и родственные процессы. Условные обозначения на чертежах. Сварные соединения".

²⁾ В Российской Федерации действует ГОСТ Р ИСО 5817—2009 "Сварка. Сварные соединения из стали, никеля, титана и их сплавов, полученные сваркой плавлением (исключая лучевые способы сварки). Уровни качества".

³⁾ В Российской Федерации действует ГОСТ Р ИСО 6520-1—2012 "Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением".

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2a, 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 03.09.2019. Подписано в печать 28.10.2019. 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.