ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 2 февраль 2012

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А.
КОЛЕСНИКОВ А.Г.

Зам. Главного редактора:
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГАРИБОВ Г.С.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЕВСЮКОВ С.А.
ЕРШОВ М.Ю.
ЗАРУБИН А.М.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
КОРОТЧЕНКО А.Ю.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ В.И.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ШЕСТАКОВ Н.А.
ШПУНЬКИН Н.Ф.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ЛУТОВИНИНА О.Н.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

Тел.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Факс: (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Артамонова Ю.С., Изотов В.А., Акутин А.А., Барабанов Р.В. Возможность применения дождевой литниковой системы для заливки форм сплавами на основе алюминия . . . 3
Гасанли Р.К. Влияние легирующих элементов на структурное состояние литого и отожженного чугуна . . . 5
Артеменко Ю.А., Рыжков Е.В., Болотин Н.С. Моделирование процессов модифицирования износостойких наплавочных сплавов . . . 9

Кузнечно-штамповочное производство

Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Экспериментальные исследования процесса удара при осадке цилиндрических заготовок . . . 12
Денищев Т.В., Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Попов Н.Е. Исследование влияния технологических параметров на разностенность при комбинированном выдавливании крупногабаритных поковок типа "стакан" . . . 16
Кутилова О.И., Магницкая С.Ф., Фролова И.Н. К вопросу выбора метода получения заготовки . . . 22

Прокатно-волочильное производство

Сысоев С.Н., Никитин Р.А. Камерное захватное устройство для транспортировки бухты медной трубки упорядоченной намотки . . . 30

Материаловедение и новые материалы

Муратов В.С., Юдаев Д.П. Структура и механические свойства сварных соединений из листовых полуфабрикатов сплава 1545К в нагартованном и отожженном состояниях . . . 33
Фукс М.Д., Зеленин Ю.В., Кондратьев С.Ю. Исследование качества металла толстостенных труб из коррозионно-стойких сталей . . . 36
Муравьёв В.И., Ким В.А., Фролов А.В., Мартынюк А.М., Кириков А.В. О резервах традиционных технологий термической обработки сталей на пути повышения эксплуатационных свойств изделий . . . 39
Сурков В.А., Абдуллин И.Ш., Шарафеев Р.Ф., Иванова В.Н. Механические свойства порошковых материалов из меди, обработанных плазмой высокочастотного индукционного разряда пониженного давления . . . 44

Информация

Филина А.В., Грядунов И.М. Система оптического контроля качества технической продукции крупносерийного и массового производства на примере разработки автомата контроля заготовок, отрезаемых от прутка пластическим сдвигом . . . 46

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

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

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

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2012

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 2 February 2012

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

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

Editorial Assistant:
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee:
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
BOKOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
ZARUBIN A.M.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialists:
LUTOVININA O.N.

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

Ph.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Fax: (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Artamonova Yu.S., Izotov V.A., Akutin A.A., Barabanov R.V. Use of pluvial gating system for casting by alloys based on aluminum . . . 3
Gasanli R.K. Influence of alloying elements on structural condition of cast and annealed pig iron . . . 5
Artemenko Yu.A., Ryzhkov E.V., Bolotin N.S. Modeling of modification processes of wear-resistant surfacing alloys . . . 9

Forging and Stamping Productions

Feofanova A.E., Lavrinenko V.Yu. Experimental researches of impact during upsetting of cylindrical workpieces . . . 12
Denishchev T.V., Dmitriev A.M., Korobova N.V., Popov N.E. Influence of process parameters on polythickness by using combined extrusion of large-size forgings type "cup" . . . 16
Kutilova O.I., Magnitskaya S.F., Frolova I.N. Choice of blank production method . . . 22

Rolling and Drawing Productions

Sysoev S.N., Nikitin R.A. Chamber capture for coil transportation of ordered winding copper pipe . . . 30

Physical Metallurgy and New Materials

Muratov V.S., Yudaev D.P. Structure and mechanical properties of welded joints from sheet semifinished items alloy 1545K in hardened and annealed conditions . . . 33
Fuks M.D., Zelenin Yu.V., Kondrat'ev S.Yu. Study of thick-walled pipes of metal quality made of corrosion-resistant steels . . . 36
Murav'ev V.I., Kim V.A., Frolov A.V., Martynyuk A.M., Kirikov A.V. About reserves of steels heat treatment traditional technologies for improvement of products service properties . . . 39
Surkov V.A., Abdullin I.Sh., Sharafeev R.F., Ivanova V.N. Mechanical properties of powder materials from copper processed by plasma of high-frequency induction discharge of lowered pressure . . . 44

Information

Filina A.V., Gryadunov I.M. High-volume and mass production products quality optical control system on example of development of automatic inspection mashine of blanks, cut off of rod by plastic shear . . . 46

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

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2012

УДК 621.74.041

Ю.С. Артамонова, В.А. Изотов, А.А. Акутин, Р.В. Барабанов
(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьёва)

Возможность применения дождевой литниковой системы для заливки форм сплавами на основе алюминия

Приведены результаты экспериментов по определению силы гидродинамического удара струи алюминиевого расплава и оценка ее влияния на образование газовых дефектов в отливке. Определено критическое значение силы гидродинамического удара струи.

Ключевые слова: дождевая литниковая система; сила удара; рентгенодефектоскопия; загрязненность отливки; критическое значение.

The experimental results by determination of hydrodynamic stream impact value of aluminium-based alloy and estimate of its influence on gas defects formation in casting are submitted. The critical value of hydrodynamic stream impact value is defined.

Keywords: pluvial gating system; impact value; X-ray inspection; casting pollution; critical value.

Дождевые литниковые системы обеспечивают последовательное заполнение полости литейной формы расплавом без перегрева отдельных ее частей, надежное шлакоулавливание, способствуют направленному затвердеванию, что приводит к получению плотной отливки.

На стадии заполнения полости формы расплавом при использовании дождевых литниковых систем происходит взаимодействие падающей струи с поверхностью расплава, находящегося в литейной форме, которое приводит к замешиванию воздуха в расплав. При падении струи алюминиевого расплава с высоты 300 мм оксидная плена на ее поверхности не разрывается. На основании обобщения экспериментальных данных сделан вывод, что увеличение скорости падения струи и, соответственно, возрастание силы гидродинамического удара вызывает захват расплавом воздуха и приводит к увеличению вероятности образования газовой раковины и пористости в отливках.

Для оценки влияния силы гидродинамического удара струи на загрязненность отливки проведены исследования по гидромоделированию [1, 2] характера истечения алюминиевого расплава из отверстий дождевой литниковой системы и механизма распада струи на фрагменты.

Как показали эксперименты, при захвате воздуха падающей струей на входе в расплав пузыри воздуха могут не выйти на поверхность расплава до конца заполнения и образования корки металла при превышении критического значения силы удара струи.

На рис. 1 приведена песчано-глинистая форма для проведения эксперимента по определению силы гидродинамического удара струи. Параметры формы: размер полости формы типа "плита": высота 200 мм, ширина 200 мм, толщина 12 мм; высота "стояка-колодца" 250 мм, сечение размером 25×25 мм; напор в литниковой чаше 50 и 100 мм. Диаметры отверстия в литниковой чаше: $d_{отв}$ = 4, 8, 10 и 12 мм. Отливка заполнялась либо струей, либо струей и фрагментами.

Температура заливки сплава АК12 составляла 760 °С. Перед заливкой сплав рафинировали универсальным флюсом.

Количество включений в отливке определяли с помощью рентгенодефектоскопии. Загрязненность z оценивали как отношение площади включений к общей площади сечения отливки по рентгеновским снимкам.

Силу удара струи вычисляли по формуле [1]

$$N = 2\rho\pi r^2 g\mu\sqrt{H(\mu^2 H + h)}, \qquad (1)$$

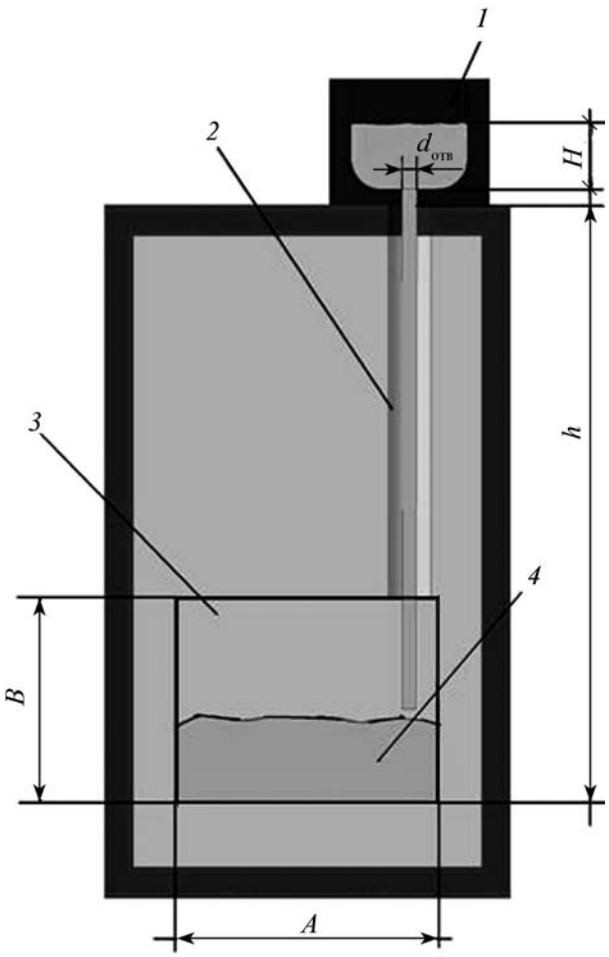


Рис. 1. Схема экспериментальной формы для определения критической силы удара струи:
1 – чаша с заливочными отверстиями; *2* – "стояк-колодец"; *3* – полость формы типа "плита"; *4* – расплав

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3; *r* – радиус отверстия, м; *g* – ускорение свободного падения струи, 9,81 м/с^2; μ – коэффициент расхода расплава в отверстиях дождевой литниковой системы простой конфигурации, μ = εφ; φ – коэффициент скорости, приняли φ = 0,97 для любой жидкости; ε – коэффициент сужения струи, приняли ε = 0,63 для круглого отверстия; *H* – напор жидкости в чаше, м; *h* – высота падения расплава, м.

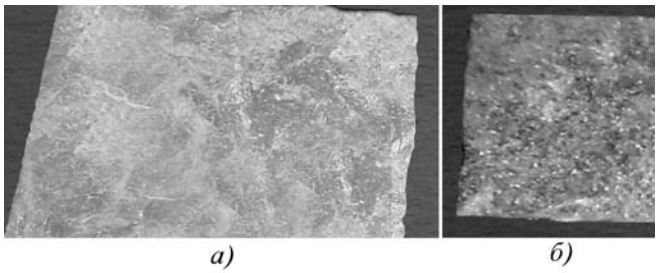


Рис. 2. Экспериментальные отливки:
а – № 3, *H* = 100 мм, $d_{отв}$ = 8 мм, *h* = 210 мм; *б* – № 5, *H* = 50 мм, $d_{отв}$ = 8 мм, *h* = 210 мм

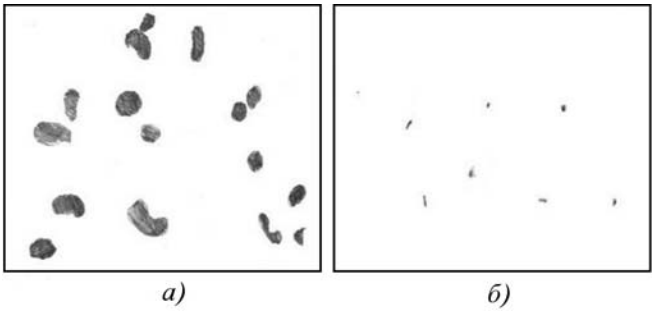


Рис. 3. Результаты рентгенодефектоскопии отливок № 3 (*а*) и № 5 (*б*)

По рассчитанным параметрам осуществляли экспериментальные заливки. Каждую отливку изготовляли при определенных значениях диаметра отверстия в чаше, напоре и силе удара струи. При этом первые три отливки заливались компактной струей. Оставшиеся отливки заполнялись струей, состоящей из компактной части и фрагментов.

Некоторые экспериментальные отливки представлены на рис. 2, а на рис. 3 – результаты рентгенодефектоскопии экспериментальных отливок.

Загрязненность рассчитывали по формуле

$$z = \frac{S_{вкл}}{S_{отл}} \cdot 100\,\%, \qquad (2)$$

где $S_{вкл}$ – площадь включений, м^2; $S_{отл}$ – площадь сечения отливки, м^2, $S_{отл} = AB$ (см. рис. 1).

Результаты расчетов приведены в таблице.

По результатам экспериментов на сплаве АК12 и рентгенодефектоскопии была оценена загрязненность образцов и построена зависимость загрязненности от силы удара струи о поверхность расплава (рис. 4).

Анализ результатов показал, что значительный рост загрязненности наблюдается при достижении

Влияние силы удара струи на загрязненность отливок

Номер отливки	Диаметр отверстия $d_{отв}$, м	Напор *H*, м	Расчетная сила удара струи *N*, Н	Загрязненность *z*, %
1	0,012	0,1	0,498	6,5
2	0,010		0,345	6,34
3	0,008		0,221	4,66
4	0,010	0,05	0,236	4,02
5	0,008		0,118	0,25
6	0,004		0,038	0,12

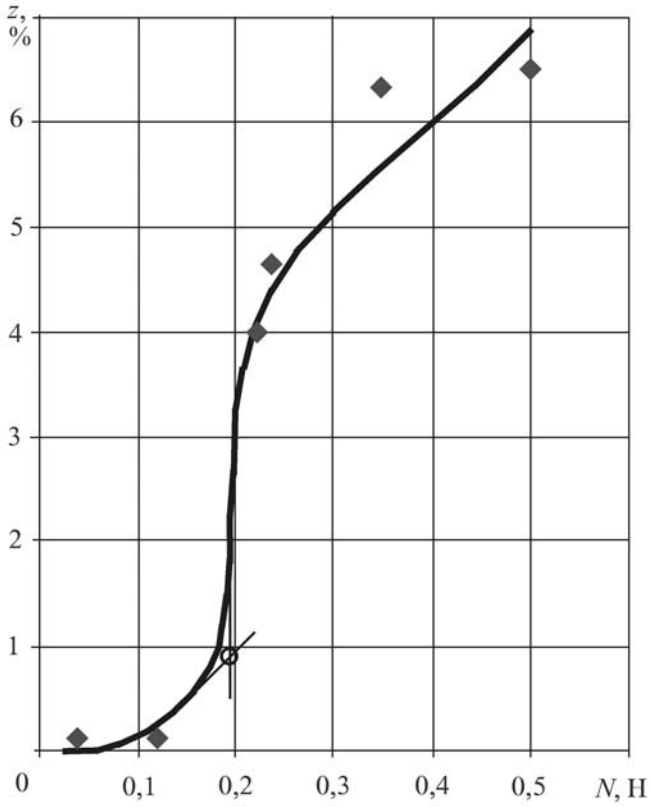
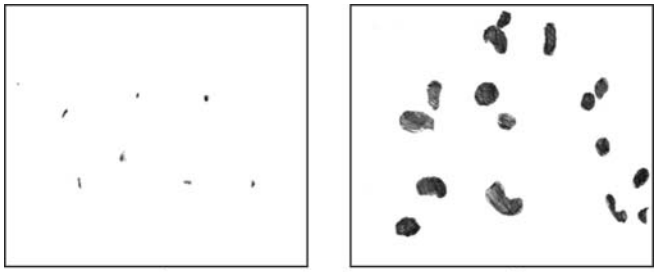


Рис. 4. Зависимость загрязненности *z* от силы удара струи *N*

силы удара 0,2 Н и выше (рис. 5), т.е. критическое значение $N_{кр}$ = 0,2 Н.

Таким образом, чем больше сила удара струи, тем больше размер газовых дефектов в отливке.



а) *б)*

Рис. 5. Рентгеновские снимки отливок, залитых с силой удара меньше (*а*) и больше (*б*) критического значения:
а – отливка № 5, *N* = 0,12 Н, *z* = 0,25 %; *б* – отливка № 3, *N* = 0,22 Н, *z* = 4,66 %

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исследование** процесса заполнения полости формы протяженных тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов дождевой литниковой системой / А.А. Шатульский, В.А. Изотов, Р.В. Барабанов, А.А. Акутин // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2010. № 1 (16). С. 107–115.

2. **Асмамау Т.А., Изотов В.А., Шатульский А.А.** Моделирование процесса истечения расплава в дождевых литниковых системах // Литейщик России. 2008. № 1. С. 16–18.

Юлия Сергеевна Артамонова, аспирант,
yulipyn@mail.ru;
Владимир Анатольевич Изотов, канд. техн. наук;
Алексей Анатольевич Акутин, канд. техн. наук;
Роман Викторович Барабанов, аспирант

УДК 669.131.7:621.78

Р.К. Гасанли *(Азербайджанский технический университет, г. Баку)*

Влияние легирующих элементов на структурное состояние литого и отожженного чугуна

Изучена микроликвация кремния в кокильном экономнолегированном высокопрочном чугуне (ВЧШГ). Установлено, что ВЧШГ в литом состоянии преобладает структура белого чугуна, состоящая из перлита и ледебурита. Выявлено, что во время отжига происходит перераспределение кремния и наиболее обогащенными оказываются области, примыкающие к графиту.

Ключевые слова: микроликвация; высокопрочный чугун; шаровидный графит; кокиль; экономное легирование; структура; свойства.

Microliquation of silicon in metal mould economically alloyed high-strength cast iron is studied. It is established that high-strength cast iron to be received in metal mould in cast condition has the structure of white cast iron consisting of pearlite and ledeburite. It is revealed that during annealing there is redistribution of silicon and more concentration appear in the areas adjoining to graphite.

Keywords: microliquation; high-strength cast iron; spheroidal graphite; metal mould; economical alloying; structure; properties.

Целью работы является изучение микроликвации кремния в кокильном экономнолегированном высокопрочном чугуне (ВЧШГ). Изучение микроликвации кремния в кокильном ВЧШГ, проведенное с помощью травления в горячем щелочном растворе пикриновой кислоты по методике [1], показало, что имеется суще-

а) *б)* *в)*

Рис. 1. Микроструктура никелевых чугунов в литом состоянии (×100):
а – 1 % Ni; *б* – 1,5 % Ni; *в* – 2 % Ni

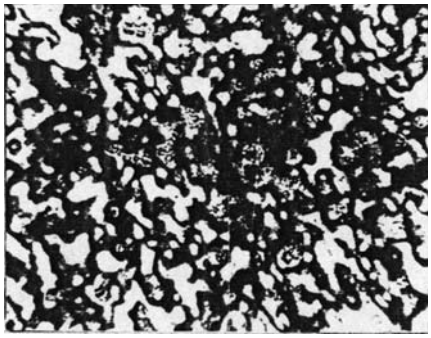


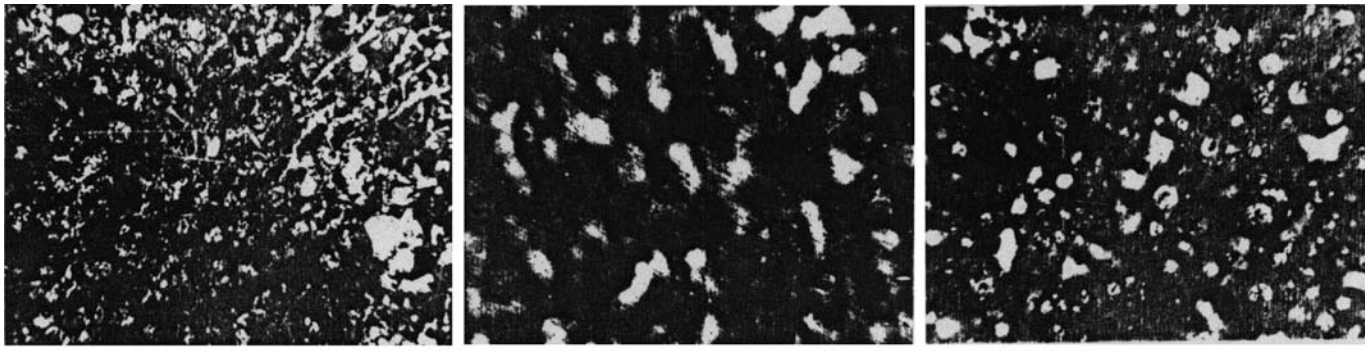
Рис. 2. Распределение кремния в нелегированном чугуне (травлено пикратом натрия). ×100

ственное ее отличие от ВЧШГ, отливаемого в песчаную форму. Анализ ВЧШГ, получаемого в кокилях, в литом состоянии показал, что чугун приобретает структуру белого чугуна, состоящую из перлита и ледебурита.

Экономнолегированный чугун в литом состоянии по структуре несущественно отличается от нелегированного кокильного ВЧШГ. Однако никель в количестве от 1,0 до 2,0 % усиливает отбел чугуна и измельчает эвтектические зерна (рис. 1). Распределение кремния в нелегированных кокильных чугунах связано с их литой структурой и имеет устойчивый характер, не изменяясь после отжига, нормализации и отпуска. Участки металла, представляющие собой до отжига цементит, сохраняют свой химический состав с низким содержанием кремния (рис. 2). Медь и никель в области температур кристаллизации повышают активность углерода (как и кремния) и поэтому являются конкурентами последнего в процессе распределения в кристаллической решетке железа.

Распределение кремния в легированных Ni и Cu чугунах, отлитых как в кокиль, так и в песчано-глинистую форму, близко к равновесному (рис. 3). Лишь небольшие области по границам аустенитного зерна имеют пониженное содержание кремния. Однако и в этом случае контраст в окраске шлифа незначителен. В никелевых чугунах наблюдается неоднородное распределение кремния, отражающее литую аустенито-ледебуритную структуру (рис. 4).

Размер чередующихся областей (по концентрации Cu) уменьшается с увеличением содержания никеля в сплаве, а контраст усиливается. Такая неоднородность не вызывает ухудшения свойств, что можно было бы ожидать в соответствии с существующими воззрениями на влияние микроликвации кремния на ударную вязкость *КС* при пониженных температурах.



а) *б)* *в)*

Рис. 3. Распределение кремния в чугуне, легированном Ni и Cu (×100):
а – травлено пикратом натрия; *б*, *в* – травлено 4%-ным раствором HNO_3

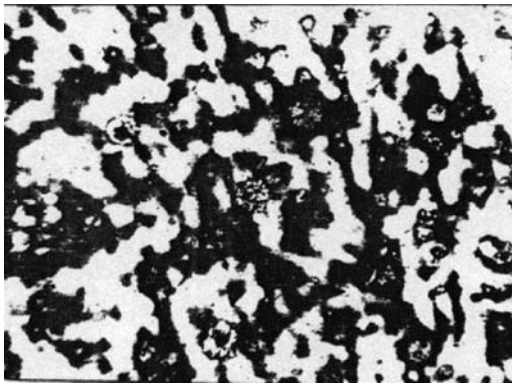
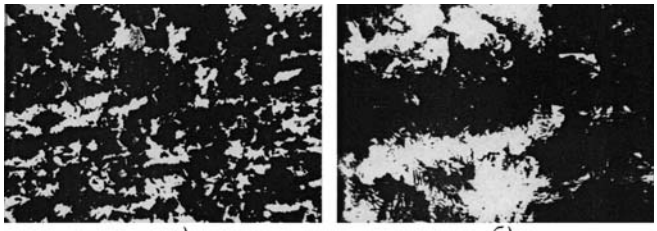


Рис. 4. Распределение кремния в чугуне, легированном Ni (травлено пикратом натрия). ×100

В кокильном легированном, как и нелегированном чугуне с частичным отбелом, наиболее обогащенными кремнием являются границы областей, занятых стабильной и метастабильной эвтектиками. Высокая концентрация кремния наблюдается между пластинчатыми колониями ледебурита. Эти области интенсивно окрашены (на фотографиях – темные, рис. 5). Вокруг графита наблюдается наиболее высокая концентрация кремния.

В отличие от половинчатых чугунов при сквозном отбеле кремний в основном сосредоточен в высококремнистых составляющих: между эвтектическими колониями в сложных эвтектиках, одной из фаз в которых является силикокарбид (СК), либо в карбидном эвтектоиде (Ц + СК) [2], окантовывающем цементит. В первичном и эвтектическом аустените (перлите) содержание кремния понижено.

Ряд исследователей считают, что отжиг обязательно должен приводить к выравниванию химического состава при выдержке сплава в аустенитной области [3, 4]. Согласно другой точке зрения, возникшая при кристаллизации неоднородность химического состава очень устойчива и принципиально не может быть устранена термической обработкой и, в частности, отжигом [4].



а) *б)*

Рис. 6. Микрораспределение кремния в кокильном чугуне после отжига и нормализации:
а – ×100; *б* – ×800 (травление пикратом натрия)

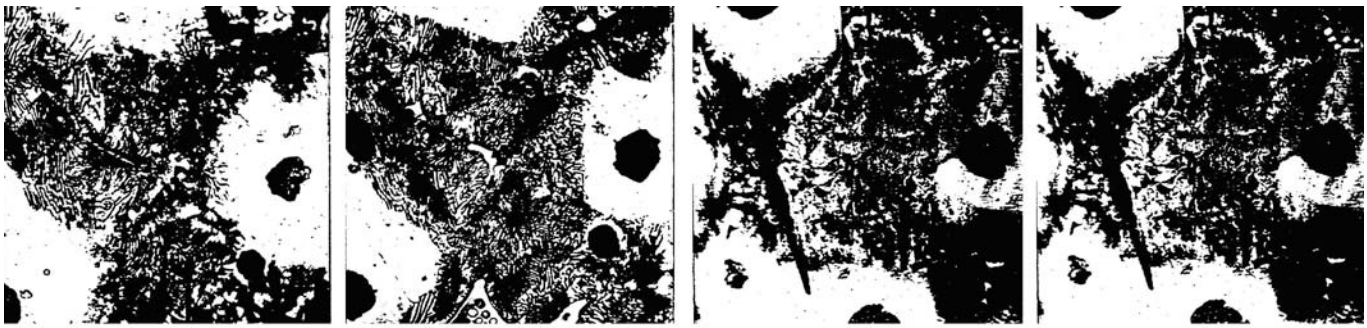
Травление отожженного чугуна пикратом натрия выявило в нем следующую нехарактерную картину микрораспределения кремния: четкое чередование областей, обогащенных и объединенных кремнием, первые из которых располагаются вокруг графитных включений, вторые – в местах, где до отжига был цементит.

Взаимное расположение, конфигурация и размер объединенных кремнием областей совпадают с расположением и формой цементитных пластин либо ледебуритных колоний. У краев отливки – полосчатый рисунок, характерный для направленной кристаллизации, в центре – однородные по составу зоны близки к равноосным.

Таким образом, установлено, что во время отжига происходит перераспределение кремния и наиболее обогащенными оказываются области, примыкающие к графиту.

Однако указанное перераспределение происходит только в пределах бывших перлито-ферритных (аустенитных при кристаллизации) областей. В местах расположения эвтектического цементита содержание кремния остается пониженным и после аустенитизации металлической основы, а также окончательной термической обработки – нормализации (рис. 6).

Полученный результат согласуется с данными работы [4], согласно которым при кристаллизации возникает химическая поляризация, вызванная различным сродством элементов к углероду. Карбидообра-



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 5. Микрораспределение кремния в кокильной отливке (×800):
а, *в* – травлено пикратом натрия; *б*, *г* – травлено 4%-ным раствором HNO_3

Механические свойства чугуна

Марка чугуна	Литейная форма	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	*KC*, Дж/см^2, при температуре, °С			Твердость, НВ
					+20	–20	–60	
		Не менее						
ВЧ 40	Кокиль	480	300	18	100	80	70	140...170
	Песчаная	400	250	15	30	25	20	140...202
ВЧ 50	Кокиль	560	380	10	–	–	–	190...230
	Песчаная	500	320	7				153...245
ВЧ 60	Кокиль	660	410	5	40	30	30	220...260
	Песчаная	600	370	3	25	20	15	192...277

Примечание. Значения ударной вязкости для ВЧ 50 не регламентируются.

зующие элементы (Mn и др.) сосредотачиваются при кристаллизации в цементите, а способствующие графитизации (Si, Ni, Cu и др.) – в аустените. Такая поляризация очень устойчива.

Выявленная микроликвационная картина отражает неоднородное распределение не только кремния, но и других элементов.

Таким образом, исследуемый чугун можно рассматривать как композиционный материал, имеющий гетерогенную структуру с перекрестным армированием, состоящей из чередующихся высококремнистых областей, обладающих высокой твердостью и хрупкостью, и почти бескремнистых, более пластичных зерен, вероятно, легированных Mn.

Установлено, что более высокие механические свойства наблюдаются при полном либо значительном отбеле легированных кокильных отливок (превышающем 50 %). Размер однородных по составу микрообластей и графитных включений с увеличением переохлаждения кристаллизующего сплава уменьшается, что также положительно сказывается на свойствах чугуна.

Общепринято мнение, что ликвация нежелательна, так как снижает пластичность материала. Однако даже после отжига достичь полной однородности по химическому составу не удается. Поэтому следует стремиться к созданию такой структуры чугуна, в которой однородные по химическому составу микрообласти были бы максимально мелкими, а хрупкие и пластичные зоны рационально сочетались, образуя гетерогенную структуру. Именно такая структура получена в кокильных магниевых чугунах, подвергнутых отжигу, что способствовало повышению механических и эксплуатационных свойств по сравнению с литьем в разовую форму (таблица) [5] .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Металловедение** и термическая обработка металлов: справ. / под ред. М.Л. Брейнштейна, А.Л. Рахштадта. М.: ГОНТИЛ, 2000. Т. 1. 747 с.

2. **Мирошниченко О.Н., Солнцев Л.А.** Особенности микроструктуры магниевого чугуна, отлитого в кокиль // Металловедение и термическая обработка металлов. 2000. № 1. С. 36.

3. **Бунин И.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.П.** Основы металлографии чугуна. М.: Металлургия, 2003. 413 с.

4. **Ильинский В.А., Жуков А.А. и др.** Новое в теории графитизации. Связь между первичной и вторичной кристаллизацией графитизирующихся железоуглеродистых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1998. № 10. С. 10–16.

5. **Гасанли Р.К.** Высокопрочный чугун с шаровидным графитом. Баку: Наука, 1998. 203 с.

Рамиз Камандар оглы Гасанли, канд. техн. наук,
hasanli_dr@mail.ru

УДК 621.791.92

Ю.А. Артеменко, Е.В. Рыжков, Н.С. Болотин
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)

Моделирование процессов модифицирования износостойких наплавочных сплавов

Предложена методика моделирования процессов первичной кристаллизации сплавов, близких к эвтектическим, при наличии модификаторов. Выявлена возможность получения полностью эвтектической структуры при наплавке номинально заэвтектических сплавов типа белых чугунов в широком диапазоне отклонений от номинального состава.

Ключевые слова: наплавка; износостойкие сплавы; эвтектика; модифицирование; методика моделирования.

The simulation technique of primary crystallization of alloys similar to eutectic alloys in the presence of modifiers is offered. The possibility of fully eutectic structure during surfacing of nominal hypereutectic alloys of type white cast irons in wide range of deviations from the nominal composition is revealed.

Keywords: surfacing; wear-resistant alloys; eutectic; modification; simulation technique.

Износостойкие сплавы типа высокохромистых белых чугунов широко применяют для поверхностного и объемного упрочнения электродуговой наплавкой деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания в сочетании с динамическими нагрузками умеренной интенсивности.

В этих сплавах оптимальное сочетание эксплуатационных характеристик (ударо- и износостойкость) достигается при полностью эвтектической структуре, имеющей тонкодисперсное строение. В доэвтектических сплавах наличие дендритов твердого раствора значительно снижает сопротивляемость абразивному воздействию. В заэвтектических сплавах наличие хрупких первичных карбидов в большинстве случаев не допускает их использования при наличии даже минимальных ударных нагрузок.

Особенности формирования структуры при наплавке (отклонение химического состава наплавленного металла от номинального, интенсивное перемешивание и др.) обусловливают необходимость получения неравновесной квазиэвтектической микроструктуры околоэвтектических сплавов путем торможения роста первичных фаз. Это возможно при нестационарных режимах кристаллизации [1] и/или при модифицировании. Микролегирование элементами, образующими в расплаве тугоплавкие частицы (применительно к белым чугунам – карбиды Ti, V, Nb), способствует созданию дополнительных центров кристаллизации (модификаторы I рода) с последующим измельчением микроструктуры.

Микролегирование металлами, имеющими температуру плавления одного порядка с основным металлом, способствует изменению свойств расплава (вязкости, поверхностного натяжения, диффузионной способности и т.п.). Адсорбируясь на поверхностях растущих кристаллитов, они способствуют изменению характера кристаллизации отдельных фаз эвтектики (модификаторы II рода).

Моделирование закономерностей кристаллизации при наплавке околоэвтектических сплавов при наличии модификаторов осуществляли по методике микроскопических исследований процессов затвердевания оптически прозрачных материалов по схеме "неподвижная ванна–вращающийся образец" [2] (рис. 1).

В качестве компонентов модельной солевой системы выбирали калийную селитру KNO_3 ($T_{пл}$ = 334 °С), моделирующую твердый раствор, и хлористый калий KCl ($T_{пл}$ = 778 °С), имитирующий тугоплавкую фазу типа карбидов и ограниченно растворяющийся в KNO_3. Эвтектическая точка соответствует 4,6 % KCl по массе и температуре 312 °С. В качестве модификатора I рода использовали хлористый натрий NaCl ($T_{пл}$ = 801 °С), не растворимый в KNO_3, а в качестве модификатора II рода – гидрооксид калия KOH ($T_{пл}$ = 380 °С), ограниченно растворяющийся в KNO_3 и KCl.

Рис. 1. Внешний вид наплавочной ванны

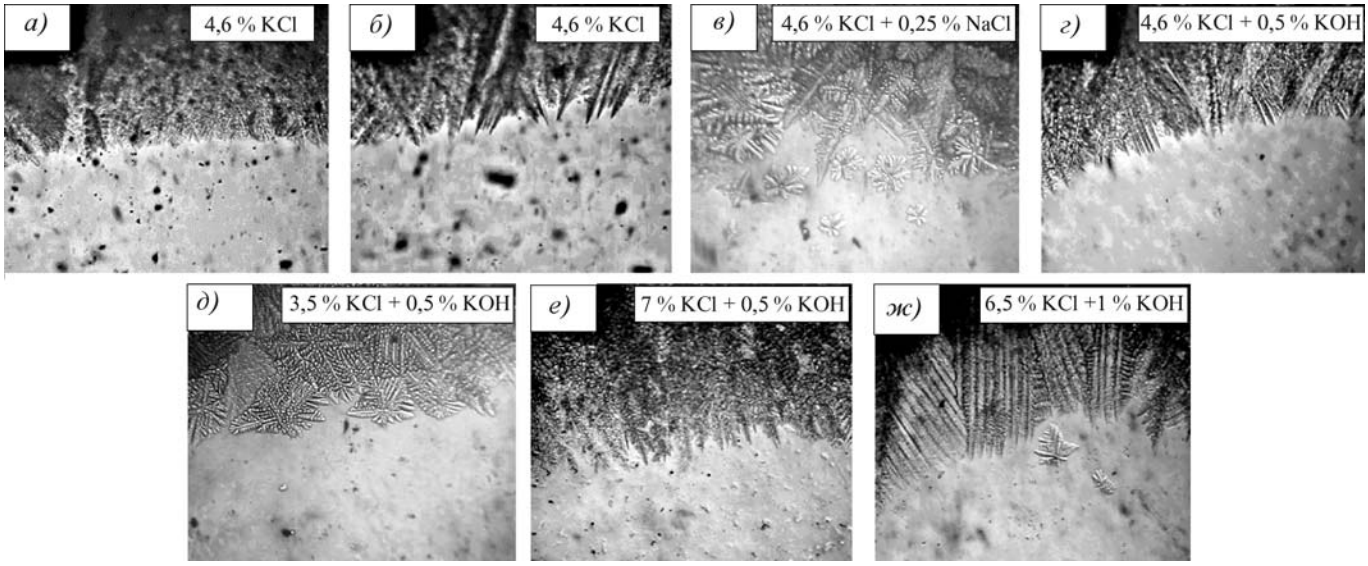


Рис. 2. Строение фронта кристаллизации в зависимости от добавок модификаторов и скорости наплавки:
а, *в* – *ж* – 0,12 мм/с; *б* – 0,28 мм/с

Выявлены закономерности влияния добавок модификаторов и параметров режима процесса, имитирующего наплавку, на строение *фронта кристаллизации* (ФК) и на интенсивность зарождения и кинетику роста *равноосных кристаллитов* (РОК) первичных фаз, возникающих в объеме расплава. Результаты микроскопических наблюдений фиксировали видеосъемкой.

Квазиплоский ФК, характерный для кристаллизации сплава эвтектического состава при малой скорости наплавки $v_н$, приведен на рис. 2, *а*. РОК отсутствуют. С увеличением $v_н$ в 2–3 раза меняется морфология эвтектики (рис. 2, *б*). Наблюдается образование эвтектических разветвленных дендритов. РОК также отсутствуют, что подтверждает эвтектический характер кристаллизации.

При добавке малых количеств 0,25 % модификатора I рода в эвтектический сплав наблюдается нарушение квазиплоского ФК и появление мелких РОК первичной фазы (рис. 2, *в*). Эффект усиливается при любых отклонениях от эвтектической концентрации и с повышением $v_н$. При избытке NaCl количество РОК и скорость их роста стремительно растут (перемодифицирование). При этом основной ФК практически не изменяется.

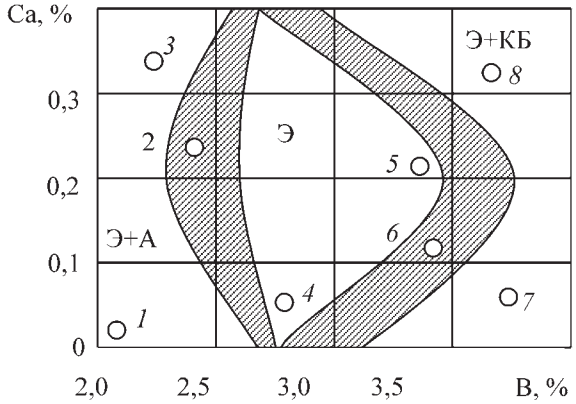


Рис. 3. Структурная диаграмма наплавленного металла:
Э – эвтектика; А – аустенит; КБ – карбобориды

Действие модификатора II рода более сложное. Добавка 0,5 % KOH в эвтектический сплав дает эффект, аналогичный увеличению $v_н$, т.е. изменяется морфология эвтектики (рис. 2, *г*). Эвтектические дендриты становятся более тонко разветвленными. При избытке KOH они укрупняются, велика также вероятность образования крупных РОК первичной фазы (рис. 2, *ж*).

В доэвтектическом сплаве активизируется зарождение РОК в расплаве с их последующим быстрым ростом. ФК практически полностью формируется из крупных РОК (рис. 2, *д*). В этом случае KOH выступает в качестве модификатора I рода.

Наибольший интерес представляет эффект от введения оптимального количества KOH в заэвтектические сплавы. В результате подавления роста тугоплавкой фазы наблюдается полностью эвтектическая кристаллизация для номинально заэвтектических сплавов с концентрацией до 7 % KCl (рис. 2, *е*). На практике это означает возможность получения эвтектической структуры при наплавке в широком диапазоне отклонений от номинального состава сплавов.

Для проверки результатов моделирования проведен эксперимент по наплавке порошковой проволоки марки ПП-АН125 (ПП-200Х15С1ГРТ). Параметры режима наплавки: ток дуги 350 А; напряжение на дуге 30...32 В; скорость наплавки 0,5 см/с. Структура на-

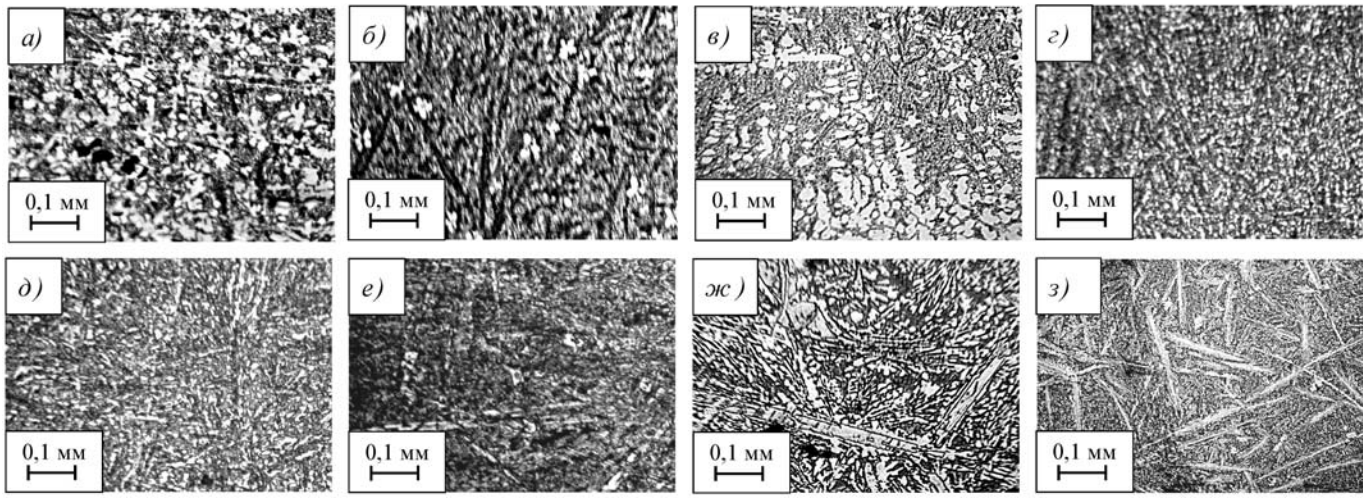


Рис. 4. Микроструктура наплавленного металла:
а–з – соответственно точки *1–8* на рис. 3

плавленного металла доэвтектическая с первичными кристаллами аустенита (рис. 4).

Для получения эвтектической и заэвтектической микроструктур наплавленный металл дополнительно легировали бором путем предварительного нанесения на наплавляемый образец слоя порошка ферробора ФБ20, который для предотвращения сдувания в процессе наплавки фиксировали цапонлаком.

В порошок ферробора в качестве модификатора II рода добавляли силикокальций СК30, выбор которого продиктован данными работы [3] об эффективности добавки силикокальция в шихту порошковой проволоки при наплавке высокопрочного серого чугуна. Количество ферробора и силикокальция на единицу площади образца изменяли.

При анализе микроструктуры особое внимание уделяли на наличие и размер первичных фаз и морфологию эвтектики. Результаты металлографического анализа приведены на структурной диаграмме (рис. 3) и микроструктурах (рис. 4).

Из диаграммы следует, что полностью эвтектическая структура при отсутствии модификатора может быть получена в узком (2,5...3,0 %) диапазоне концентраций бора. С уменьшением концентрации бора появляются дендриты аустенита (см. рис. 4, *а*), при увеличении – первичные карбобориды (см. рис. 4, *ж*).

С введением до 0,2 % Са область эвтектической концентрации расширяется до 2,3...3,7 %. Карбидная фаза измельчается (см. рис. 4, *е*). При повышении содержания Са свыше 0,3 % эффект модифицирования ослабевает. Область эвтектической концентрации опять сужается, размеры первичных фаз значительно увеличивается, т.е. получаем эффект перемодифицирования.

В полученных образцах по методике [4] определяли деформацию зарождения трещины в качестве показателя ударостойкости, а также твердость HRC. В номинально заэвтектическом наплавленном металле после добавки модификатора удалось получить повышение ударостойкости в 2–3 раза в результате формирования квазиэвтектической микроструктуры. Твердость наплавленного металла практически не изменялась.

Заключение. Рекомендована добавка силикокальция в шихту порошковых проволок типа ПП-АН125 или ПП-АН170, а также наплавочных электродов типа Т-620 для модифицирования в целях повышения ударостойкости наплавленного металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Эллиот Р.** Управление эвтектическим затвердеванием. М.: Металлургия, 1987. 352 с.

2. **Исследование** процессов кристаллизации при наплавке износостойких сплавов на прозрачных солевых моделях / Ю.А. Артеменко, Д.В. Бартенев, А.В. Макушенко и др. // Технология металлов. 2008. № 8. С. 41–42.

3. **Любич А.И., Пустовгар А.В.** Влияние силикокальция на структуру и свойства наплавленного металла // Сварочное производство. 2002. № 6. С. 46–47.

4. **Воротников В.Я., Иванов С.В., Артеменко Ю.А.** Методика определения стойкости наплавочных сплавов к ударным нагрузкам // Автоматическая сварка. 1983. № 9. С. 61–62.

Юрий Александрович Артеменко, канд. техн. наук,
naplavka48@mail.ru;
Егор Владимирович Рыжков, аспирант;
Николай Сергеевич Болотин, магистрант

УДК 621.771

А.Е. Феофанова *(Московский государственный технический университет "МАМИ")*,
В.Ю. Лавриненко *(Московский государственный индустриальный университет)*

Экспериментальные исследования процесса удара при осадке цилиндрических заготовок

Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований особенностей процесса ударного деформирования при осадке цилиндрических заготовок, показывающие возможность увеличения времени контакта бабы с заготовкой, что можно использовать в технологических целях при ковке на молотах.

Ключевые слова: осадка; ударное деформирование; баба молота; высокоскоростная видеосъемка.

Results of the experimental and theoretical researches of the features of impact deformation during upsetting of cylindrical workpieces with increasing of contact time between the ram and workpieces are shown. It can be used for technological purposes during drop forging.

Keywords: upsetting; impact deformation; ram of hammer; high-speed video camera.

Постановка экспериментов по горячему пластическому деформированию стальных заготовок в лабораторных и производственных условиях связана со значительной трудоемкостью и большими затратами. Поэтому процессы горячего деформирования моделируют на свинце с использованием теории подобия. Данный метод моделирования позволяет провести качественное и количественное изучение процесса деформирования на моделях, определить основные закономерности формоизменения, энергосиловые и другие параметры исследуемого процесса, и на основе полученных данных разработать новые технологические процессы.

Свинец при комнатной температуре деформируется с одновременной рекристаллизацией, как и сталь при ковочных температурах. Диаграммы деформирования различных сталей в горячем состоянии и свинца качественно почти не отличаются.

Напряжение текучести σ_s свинца зависит от температурно-скоростных условий деформации. Для свинца величина σ_s составляет от 5 до 50 МПа, поэтому необходимо учитывать факторы, влияющие на эту величину: химический состав свинца, скорости деформации и степени деформации свинца при комнатной температуре. Степень деформации до 10 % значительно влияет на σ_s, а свыше 13...15 % ее влияние минимально. Наибольшее влияние на σ_s оказывает скорость деформации.

При работе со свинцовыми заготовками необходимо поддерживать постоянную температуру 20 °С. В случае понижения температуры эксперименты не дают стабильных результатов, а повышение температуры больше 20 °С ведет к росту зерна, а также к неоднородности свойств заготовки.

В качестве материала заготовок для моделирования горячего деформирования углеродистых и низколегированных сталей использовали прессованный свинец (степень деформации при прессовании 44 %) с химическим составом: 99,2 % Pb; 0,8 % примеси Sn, Sb, Ag и др.

Осадку свинцовых заготовок и определение параметров удара проводили на специальной экспериментальной установке (рис. 1), состоящей из вертикального копра и системы скоростной видеосъемки.

Заготовку *6* ставили на основание *2*, поднимали бабу *3* на необходимую высоту с помощью устройства подъема *5*, после чего отпускали захват *4*, и баба *3* под действием силы тяжести падала на заготовку *6*. Направление движения бабы по ходу перемещения происходило с помощью направляющих в стойках копра.

Для обеспечения условий моделирования максимального трения (при горячей ковке коэффициент трения $\mu = 0{,}35...0{,}4$) поверхности заготовки и инструмента обезжиривали ацетоном и натирали мелом.

Одновременно с началом движения бабы начинали видеосъемку с помощью скоростной цифровой видеокамеры FastVideo-250 *7*. Во время видеосъемки данные в непрерывном режиме со скоростью 660 Мбит/с поступают из контроллера во внешний переходник (фреймграббер) *8* в оперативную память компьютера *9*. При завершении исследуемого процесса видеосъемку останавливали. Обработка сохраненных графических изображений процесса в оперативной памяти компью-

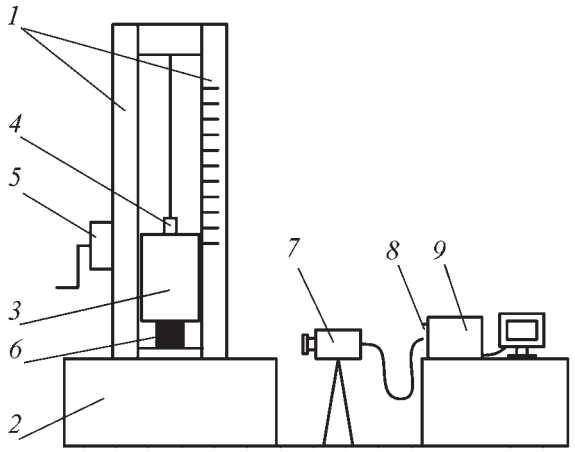


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
1 – стойки копра; *2* – основание; *3* – баба; *4* – устройство захвата бабы; *5* – устройство подъема бабы; *6* – заготовка; *7* – скоростная цифровая видеокамера; *8* – переходник; *9* – персональный компьютер

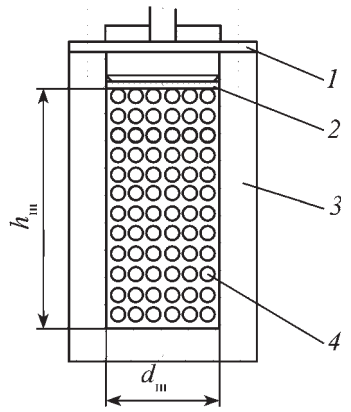


Рис. 2. Схема специальной бабы копра:
1 – крышка; *2* – упругая прокладка; *3* – корпус; *4* – наполнитель (шарики из стали ШХ15 диаметром $D_ш$ = 1; 2; 6 и 12 мм)

тера позволила определить продолжительность удара, деформацию заготовок, скорость движения бабы и скорость деформирования.

Для деформирования заготовок на копре применяли: стандартную бабу и специальную бабу (рис. 2), выполненную пустотелой и заполненную металлическими шариками [1].

Для обеспечения возможности сравнения результатов экспериментов по осадке со стандартной и специальной бабами их массы принимали одинаковыми и равными 22,3 кг. Масса корпуса специальной бабы составляла 13,4 кг, а масса засыпаемых внутрь шариков $m_ш$ = 4,5; 6,7 и 8,9 кг (отношение массы шариков к общей массе бабы K_M = 0,2; 0,3 и 0,4 соответственно).

Ограничение по массе засыпаемых шариков до 40 % от общей массы бабы связано с конструктивными возможностями изготовления бабы по критериям прочности при эксплуатации. Между крышкой *1* специальной бабы (см. рис. 2) и шариками *4* установлена упругая прокладка *2* из поролона, которая обеспечивает предварительное упругое поджатие шариков в бабе.

Обычно осадка на молотах происходит за несколько ударов бабы молота. За каждый последующий удар заготовку осаживают на меньшую высоту, и развиваются большие силы деформирования. Чем больше необходимая сила деформирования и чем меньше величина осадки достигается за каждый удар, тем меньше КПД удара и тем больше потери на сотрясение шабота, фундамента, упругую деформацию бойков и т.д.

В течение последнего удара бабы молота возникают максимальные силы деформирования и достигается минимальная величина осадки за весь процесс (обычно не более 10 %). Для совершения экономичной осадки за последний удар необходимы определенная работа деформации и соответствующая энергия падающих частей, которая будет заведомо достаточна для получения экономичной осадки за предыдущие удары. Таким образом, расчет оптимальных размеров исходных заготовок и необходимой массы падающих частей молота для осадки нужно проводить по последнему удару молота.

Процесс осадки исследовали на заготовках-моделях. По данным завода УЗТМ для молотов с массами падающих частей от 1 до 5 т среднее отношение массы падающих частей молота к массе заготовки $G/m_{заг} \approx 25$. Соответственно для копра с массой бабы 22,3 кг заготовка-модель имела массу 0,8 кг. Размеры заготовки-модели назначили таким образом, чтобы условию $\varepsilon_к$ = 10 % соответствовало соотношение $H_{заг}/D_{заг} \approx 0{,}5$, поскольку наиболее часто в промышленности применяют поковки с соотношением высоты к диаметру $H_{пок}/D_{пок} \approx 0{,}1...1$.

Таким образом, размеры заготовок составили: $H_{заг}$ = 26 мм; $D_{заг}$ = 50 мм.

Для определения реальных скоростей движения бабы копра провели тарировку копра по скорости. Для этого бабу сбрасывали с высот 0,5; 1,25 и 2 м, которые соответствовали основному рабочему скоростному интервалу копра. При этом осуществляли видеосъемку движения бабы на участке, равном S = 0,05 м.

Скорость движения бабы копра определяли с помощью программного комплекса "Анализатор движения "Аргус", который позволяет определять координаты объекта на исследуемом видеоизображении (рис. 3).

Зная значения хода бабы S и время движения бабы $T = Nt$ (где N – число кадров; $t = 3{,}33 \cdot 10^{-4}$ с – время одного кадра), полученные после обработки раскадровки видеоизображения, вычисляли скорость движе-

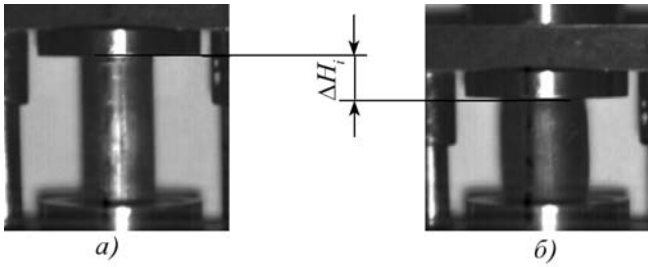


Рис. 3. Раскадровка видеоизображения процесса осадки:
а – *i*-й шаг измерения; *б* – (*i* + 1)-й шаг измерения; ΔH_i – перемещение бабы на *i*-м шаге измерения

ния бабы при ее падении в момент контакта бабы с нижним бойком:

$$v = S/T.$$

Затем экспериментальные скорости движения бабы сравнивали с теоретически возможными значениями скоростей (таблица).

Разницу между теоретическими и экспериментальными значениями скорости, не превышающую 5 %, можно объяснить наличием в направляющих копра сил трения, которые уменьшают реальную скорость движения бабы.

Видеоизображения процесса осадки (см. рис. 3) обрабатывали с помощью программы Virtual Dub.

При обработке полученных раскадровок процесса осадки определяли число кадров N_1, соответствующее нагрузочной фазе удара – от момента начала деформирования заготовки до окончания осадки заготовки, а также число кадров N_2, соответствующее разгрузочной фазе удара – от момента максимальной деформации заготовки до отскока от нее бабы.

Продолжительность каждой фазы удара вычисляли по формуле

$$T_i = N_i t,$$

а полную продолжительность всего удара:

$$T_{уд} = T_1 + T_2,$$

где T_1, T_2 – продолжительность нагрузочной и разгрузочной фазы удара соответственно.

Далее в программе "Аргус" масштабировали полученные кадры процесса осадки и измеряли перемещение бабы ΔH с шагом по времени, равным принятому времени одного кадра $t = 3{,}33 \cdot 10^{-4}$ с (см. рис. 3).

Теоретические и экспериментальные скорости движения бабы копра

Высота падения бабы *h*, м	Скорость v, м/с	
	теоретическая	экспериментальная
0,5	3,13	3,0
1,25	4,95	4,8
2,0	6,26	6,0

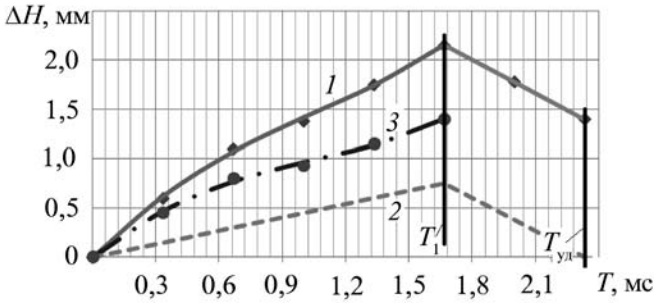


Рис. 4. Зависимости перемещения бабы и деформаций от продолжительности удара при осадке заготовок стандартной бабой для *A* = 109,3 Дж:
1 – перемещение бабы ΔH; *2* – упругая деформация системы $\Delta H_у$; *3* – пластическая деформация заготовок $\Delta H_п$

Далее определяли изменение пластической деформации свинцовых заготовок $\Delta H_п$ на нагрузочной фазе удара T_1 по следующей формуле:

$$\Delta H_п = \Delta H - \Delta H_у,$$

где $\Delta H_у$ – упругие деформации всей системы (баба, основание и корпус копра).

На рис. 4 приведены зависимости перемещения бабы ΔH, упругой деформации системы $\Delta H_у$ и пластической деформации заготовок $\Delta H_п$ от продолжительности удара *T* при осадке свинцовых заготовок стандартной бабой для работы *A* = 109,3 Дж.

Полная продолжительность удара составила $T_{уд}$ = 2,33 мс, продолжительность нагрузочной фазы T_1 = 1,67 мс (70 % от полной продолжительности удара), продолжительность разгрузочной фазы T_2 = 0,66 мс (30 % от полной продолжительности удара). Полученные данные согласуются с известными экспериментальными и теоретическими данными.

Данные кривые были аппроксимированы полиномиальными регрессионными зависимостями 4-го порядка вида $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$, на основе полученных экспериментальных значений перемещения бабы ΔH в программе анализа данных и построения графиков "FindGraph". На рис. 4 экспериментальные значения показаны рядом точек.

Кривая *3* (см. рис. 4), описывающая пластическую деформацию заготовок $\Delta H_п$, получена путем вычитания кривой *2* из кривой *1*.

Аналогично были получены зависимости пластической деформации заготовок $\Delta H_п$ от продолжительности удара *T* при осадке стандартной и специальной бабами для других значений энергии удара *A*.

Данные зависимости были использованы для построения зависимостей относительной деформации заготовок ε от продолжительности удара (рис. 5–7, см. обложку).

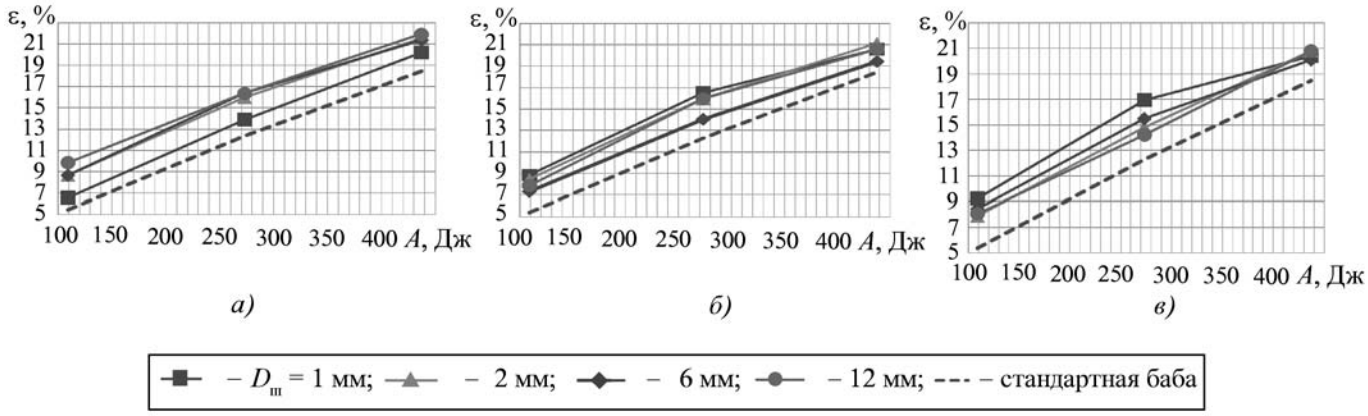


Рис. 5. Зависимости степени деформации заготовок от энергии удара при различных значениях K_M:
а – 0,2; *б* – 0,3; *в* – 0,4

Относительную деформацию заготовок определяли по формуле

$$\varepsilon = \Delta H_п / H_{заг},$$

где $H_{заг}$ = 0,026 м – исходная высота заготовки.

При осадке заготовок специальной бабой наибольшая степень деформации при K_M = 0,2 (см. рис. 5, *а*). В этом случае при энергии удара A = 109,3 Дж наибольшая степень деформации ε = 9,8 %, что в 1,8 раза больше степени деформации при осадке стандартной бабой с той же энергией. Поэтому для получения наибольшей степени деформации заготовок наиболее целесообразно применение специальной бабы с K_M = 0,2 и $D_ш$ = 12 мм.

При K_M = 0,2 (см. рис. 6, *а*) наибольшая продолжительность нагрузочной фазы удара T_1 при осадке заготовок специальной бабой с энергией удара A = 109,3 Дж имела место при использовании шариков $D_ш$ = 2 мм, что в 2 раза соответственно больше T_1 при осадке стандартной бабой; при A = 273,2 и 437,1 Дж – для шариков $D_ш$ = 2 и 6 мм соответственно. При этом наибольшее увеличение T_1 получено при использовании бабы с K_M = 0,3 и шариков $D_ш$ = 6 и 12 мм для всех параметров энергии удара (см. рис. 6, *б*). Таким образом, применение специальной бабы позволяет значительно (в 1,3–3,6 раза) увеличить продолжительность нагрузочной фазы удара T_1 по сравнению с использованием стандартной бабы.

Представленные на рис. 7 обобщенные зависимости степени деформации при осадке цилиндрических заготовок позволяют наглядно оценить увеличение степени деформации от диаметров шариков $D_ш$ при различных соотношениях K_M и энергий удара.

Заключение. В результате экспериментальных исследований процесса удара при осадке цилиндрических заготовок по разработанной методике, включающей в себя выбор материалов и оборудования, расчет размеров исходных заготовок, параметров проведения экспериментов и обработку результатов исследований, установлено, что применение специальной бабы для осадки заготовок приводит к существенному увеличению степени деформации (в 1,2–1,6 раза) и продолжительности нагрузочной фазы удара (в 1,3–3,6 раза) по сравнению со стандартной бабой, что можно использовать в технологических целях при ковке на молотах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Патент** на полезную модель 96804 (РФ). Устройство бабы молота / А.Е. Феофанова, В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов. Б.И. 2010.

Анна Евгеньевна Феофанова, д-р техн. наук;
Владислав Юрьевич Лавриненко, канд. техн. наук,
lvq1@mail.msiu.ru

УДК 621.777.01

Т.В. Денищев, А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова *(МГТУ им. Н.Э. Баумана),*
Н.Е. Попов *(ФГУП "Научно-исследовательский машиностроительный институт")*

Исследование влияния технологических параметров на разностенность при комбинированном выдавливании крупногабаритных поковок типа "стакан"

Рассмотрен процесс изготовления крупногабаритных поковок типа "стакан" выдавливанием; исследовано влияние диаметра матрицы, угла конусности матрицы, относительной высоты заготовки, относительного эксцентриситета, соотношения диаметров ступенчатой матрицы и отношения диаметра матрицы к диаметру пуансона на разностенность.

Ключевые слова: выдавливание; разностенность; ступенчатая матрица; планирование эксперимента.

The process of production of large-size forged pieces type "cup" by extrusion is considered and the influence of die diameter, die angle of taper, relative workpiece height, relative eccentricity, aspect ratio of stepped die diameters and ratio of die diameter by punch diameter on polythickness is researched.

Keywords: extrusion; polythickness; stepped die; experiment planning.

Наиболее распространенным процессом изготовления крупногабаритных корпусных поковок типа "стакан" является технологический процесс, основанный на операции обратного выдавливания (рис. 1). Полученные при этом поковки обладают рядом недостатков, одним из которых является точность полученных поковок – наличие разностенности при операциях штамповки. Это увеличивает число операций механической обработки после процесса получения поковки методами штамповки и приводит к снижению производительности, увеличению трудоемкости и станкоемкости изготовления корпусных деталей.

В статье рассмотрен процесс выдавливания по новой схеме пластического деформирования для данного типа поковок (рис. 2), применение которой позволит снизить разностенность. *Цель исследования* – получение равномерной разностенности по всей глубине выдавливания. При изучении указанной схемы определено влияние ряда технологических факторов на разностенность.

Новая схема изначально включает в себя этап комбинированного выдавливания (которое проходит всегда с наименьшими энергетическими затратами, поскольку металл сам выбирает направление течения). При этом реализуется технологический прием исключения разностенности из работы [1], затем в том же технологическом переходе реализуется схема М. Куноги. В матрицу *3* устанавливается заготовка *4*, контрпуансон *2* неподвижен. Главный пуансон *1* перемещается, деформируя заготовку. Движение главного пуансона осуществляется с заданным ходом, при этом нижний отросток не должен быть заполнен окончательно. После остановки главного пуансона начинается дви-

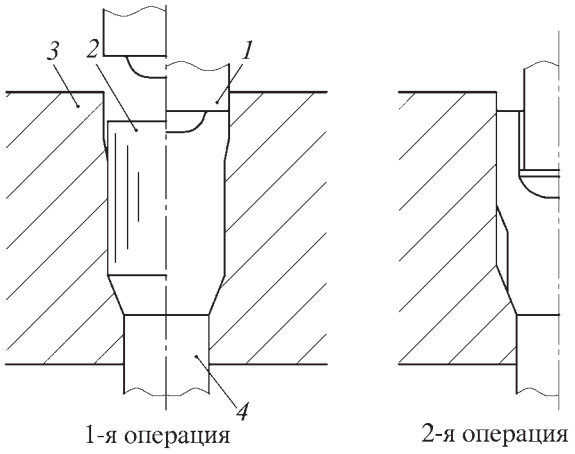


Рис. 1. Схема обратного выдавливания:
1 – пуансон; *2* – заготовка; *3* – матрица; *4* – выталкиватель

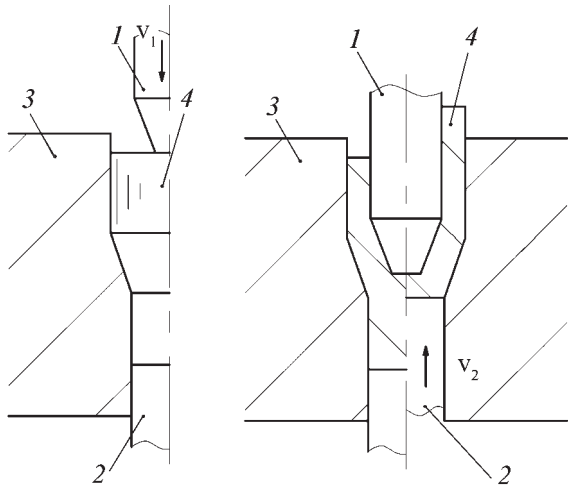


Рис. 2. Схема комбинированного выдавливания:
1 – пуансон; *2* – контрпуансон; *3* – матрица; *4* – заготовка

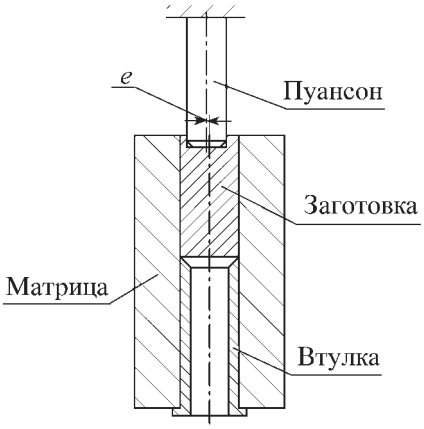


Рис. 3. Эскиз экспериментальной оснастки

жение контрпуансона до формирования окончательной поковки.

Для определения влияния диаметра матрицы, угла конусности матрицы, относительной высоты заготовки, относительного эксцентриситета, соотношения диаметров ступенчатой полости матрицы и отношения диаметра матрицы к диаметру пуансона на разностенность проведено математическое планирование эксперимента и получены зависимости.

В ходе исследования решалась задача по установлению влияния на разностенность поковки типа "стакан" схемы деформирования комбинированного выдавливания с отростком. В качестве исследуемой величины выбрано смещение Δ оси пуансона относительно оси матрицы.

Для решения поставленной задачи были проведены эксперименты по выдавливанию заготовок из свинца по предлагаемой схеме комбинированного выдавливания (рис. 3). В заготовках на верхнем торце специально вытачивали направляющее углубление, имеющее значительный эксцентриситет e относительно оси заготовки. В это углубление устанавливали пуансон, имеющий возможность самопроизвольного смещения в поперечном направлении. По результатам опытов замеряли толщины стенки для оценки наличия смещения пуансона к оси заготовки или от нее.

1. Факторы и уровни их варьирования

i	Фактор	X_i	F_i
1	Диаметр матрицы $D_м$, мм	38,7	–
		76,8	+
2	Угол конусности матрицы α, °	10	–
		30	+
3	Относительная высота заготовки $H/D_м$	2	–
		2,5	+
4	Относительный эксцентриситет $e/D_м$	0,02	–
		0,04	+
5	$R_1 = D_м/d_{отр}$	1,4	–
		1,28	+
6	$R_2 = D_м/d_{пуан}$	1,5	–
		2	+

В качестве независимых переменных были выбраны: диаметр матрицы (X_1), угол конусности матрицы (X_2), относительная высота заготовки (X_3), эксцентриситет между осью направляющего углубления на верхнем торце заготовки и осью заготовки, отнесенный к диаметру матрицы (X_4), соотношение диаметров ступенчатой полости матрицы $R_1 = D_м/d_{отр}$ (X_5), отношение диаметра матрицы к диаметру пуансона $R_2 = D_м/d_{пуан}$ (X_6). Факторы варьировали на двух уровнях. Значения факторов на верхнем и нижнем уровнях, а также интервалы варьирования приведены в табл. 1.

Для установления влияния указанных факторов на разностенность проводили эксперимент по приведенному в табл. 2 плану.

Заготовки, выдавленные в матрице с диаметром $D_м$ = 38,7 мм, разрезали пополам на проволочно-вырезном станке электроимпульсным методом (рис. 4).

2. Матрица $2^{6-3}//8$ в натуральном масштабе

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	76,8	30	2,5	0,04	1,4	1,5
2	38,7	30	2,5	0,02	1,28	1,5
3	76,8	10	2,5	0,02	1,4	2
4	38,7	10	2,5	0,04	1,28	2
5	76,8	30	2	0,02	1,28	2
6	38,7	30	2	0,04	1,4	2
7	76,8	10	2	0,04	1,28	1,5
8	38,7	10	2	0,02	1,4	1,5

Рис. 4. Результаты опытов с использованием матрицы $D_м$ = 38,7 мм

В качестве инструмента использовали тонкую проволоку. Затем на разрезанных заготовках замеряли толщины стенки в начале и конце выдавленной полости "стакана".

Заготовки, выдавленные в матрице с диаметром $D_м$ = 76,8 мм, не были разрезаны на проволочно-вырезном станке, так как не соответствовали его габаритным размерам. Поэтому для замера толщины стенки были просверлены отверстия на образующей цилиндра "стакана" (рис. 5).

Значение Δ для всех полученных заготовок вычисляли по формуле

$$\Delta = S_{низ} - S_{верх}, \quad (1)$$

где $S_{низ}$ – толщина стенки у дна полости; $S_{верх}$ – толщина стенки в верхней части полости.

В результате обработки данных натурного эксперимента получено уравнение регрессии в натуральном масштабе [2]:

$$\Delta = -2{,}899 + 0{,}00598X_1 - 0{,}0167X_2 + 0{,}504X_3 - \\ -14{,}3X_4 + 1{,}85X_5 - 0{,}436X_6 + 1{,}11X_2X_4. \quad (2)$$

Анализ полученной модели отображен в зависимости разностенности от факторов X_1–X_6 (рис. 6–11). Влияние факторов на разностенность оценивали по наличию смещения Δ оси пуансона относительно оси матрицы. Положительное его значение и увеличение, не превышающее заранее заданный эксцентриситет, т.е. смещение оси пуансона к оси матрицы, свидетельствует о наличии эффекта самоцентрирования пуансона относительно матрицы в процессе деформирования. Отрицательное его значение и уменьшение по величине, т.е. смещение оси пуансона от оси матрицы, свидетельствует об отсутствии эффекта самоцентрирования.

Рис. 5. Результаты опытов с использованием матрицы $D_м$ = 76,8 мм

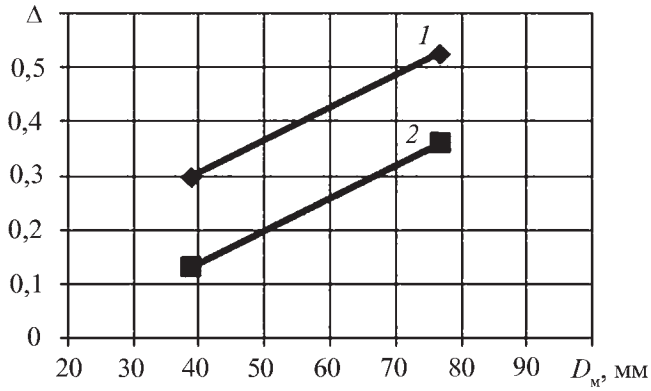


Рис. 6. Зависимости Δ от диаметра матрицы $D_м$ при $H/D_м$ = 2,5; $e/D_м$ = 0,02; $D_м/d_{отр}$ = 1,4; $D_м/d_{пуан}$ = 1,5:
1 – α = 10°; *2* – α = 20°

С увеличением диаметра матрицы $D_м$ при фиксированном диаметре пуансона возрастает смещение Δ оси пуансона к оси матрицы (см. рис. 6) в результате увеличения массы металла, воздействующей на пуансон в процессе деформирования (увеличение толщины стенки). Вследствие этого возрастает изгибающий момент за счет увеличения плеча ($l_{плеча} = S_{стенки}$). При увеличении угла конусности матрицы α смещение Δ к оси матрицы снижается.

Повышение угла конусности α ведет к увеличению смещения Δ оси пуансона к оси матрицы (см. рис. 7). Это объясняется тем, что при возрастании угла конусности возрастает реакция нормальной составляющей силы к стенкам матрицы в очаге пластической деформации. Соответственно при увеличении угла конусности возрастает действие эффекта самоцентрирования пуансона относительно матрицы.

С увеличением относительной высоты заготовки увеличивается смещение Δ оси пуансона к оси матрицы (см. рис. 8). При фиксированном значении диаметра матрицы $D_м$ и увеличивающемся угле конусности матрицы сила деформирования снижается (из-за облегчения течения металла в стенку "стакана" за счет конуса), что увеличивает смещение Δ.

Увеличение относительного эксцентриситета $e/D_м$ при угле конусности α = 10° ведет к смещению Δ оси пуансона от оси матрицы, а при угле конусности α = 20° – к смещению Δ оси пу-

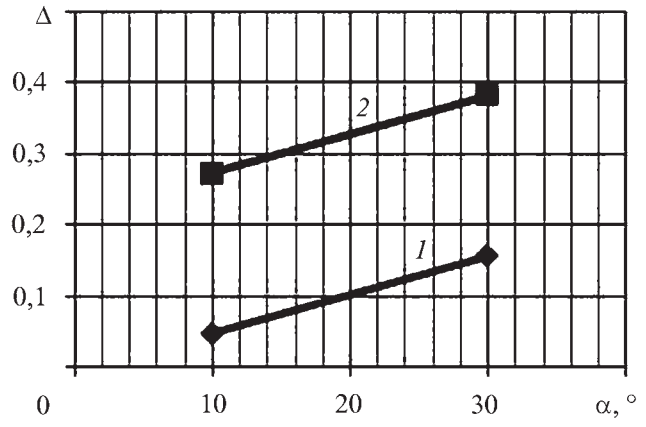


Рис. 7. Зависимости Δ от угла конусности матрицы α при $H/D_м$ = 2; $e/D_м$ = 0,02; $D_м/d_{отр}$ = 1,4; $D_м/d_{пуан}$ = 1,5:
1 – $D_м$ = 38,7 мм; *2* – $D_м$ = 76,8 мм

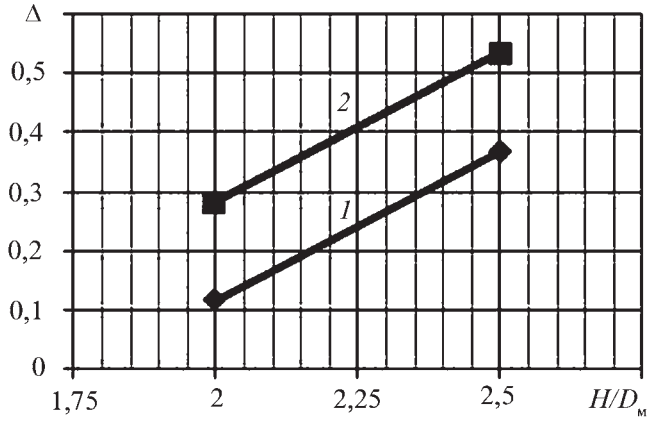


Рис. 8. Зависимости Δ от относительной высоты заготовки $H/D_м$ при $D_м$ = 55 мм; $e/D_м$ = 0,02; $D_м/d_{отр}$ = 1,4; $D_м/d_{пуан}$ = 1,5:
1 – α = 10°; *2* – α = 20°

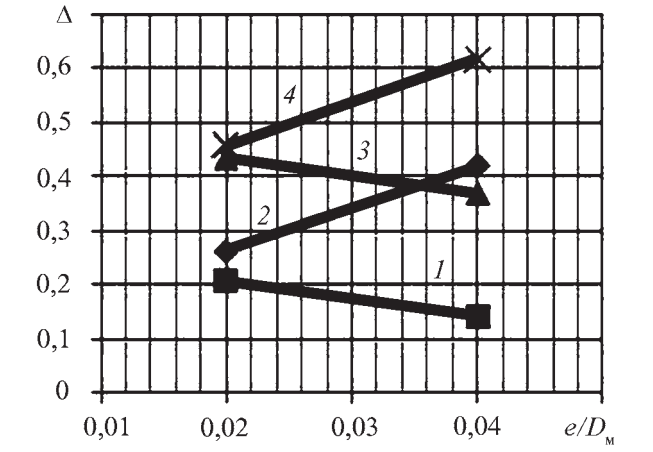


Рис. 9. Зависимости Δ от относительного эксцентриситета $e/D_м$ при $H/D_м$ = 2,5; $D_м/d_{отр}$ = 1,35; $D_м/d_{пуан}$ = 1,5:
1 – $D_м$ = 38,7 мм, α = 10°; *2* – $D_м$ = 38,7 мм, α = 20°; *3* – $D_м$ = 76,8 мм, α = 10°; *4* – $D_м$ = 76,8 мм, α = 20°

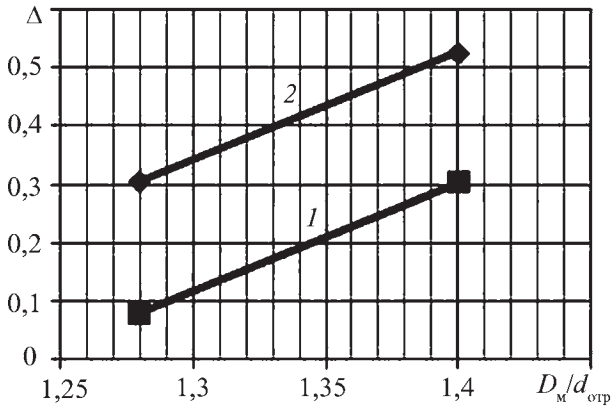


Рис. 10. Зависимости Δ от соотношения диаметров ступенчатой матрицы $D_м/d_{отр}$ при α = 10°; $H/D_м$ = 2,5; $e/D_м$ = 0,02; $D_м/d_{пуан}$ = 1,5:
1 – $D_м$ = 38,7 мм; *2* – $D_м$ = 76,8 мм

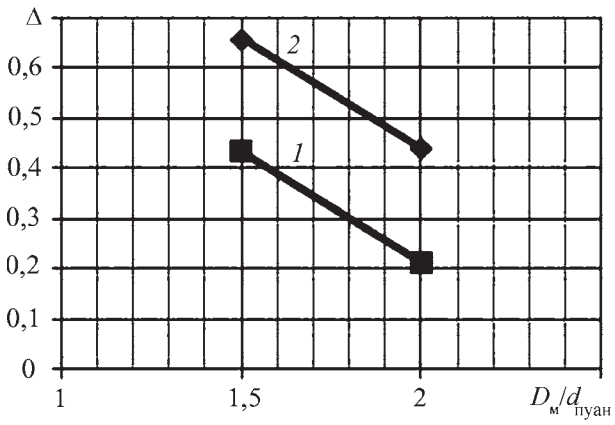


Рис. 11. Зависимости Δ от отношения диаметра матрицы к диаметру пуансона $D_м/d_{пуан}$ при α = 20°; $H/D_м$ = 2,5; $e/D_м$ = 0,02; $D_м/d_{отр}$ = 1,35:
1 – $D_м$ =38,7 мм; *2* – $D_м$ = 76,8 мм

ансона к оси матрицы (см. рис. 9). Очевидно, что существует оптимальный угол конусности матрицы, который находится в интервале 10...20°. Чтобы его определить, нужно провести дополнительные исследования по определению снижения деформирующей силы при прочих равных условиях, либо варьировать фактором, отвечающим за угол конусности, на трех уровнях.

Рост отношения $D_м/d_{отр}$ ведет к увеличению смещения Δ оси пуансона к оси матрицы (см. рис. 10). Это объясняется тем, что при уменьшении диаметра отростка в фиксированный зазор в стенку "стакана" (заданный $D_м$ и $d_{пуан}$) поступает большее количество металла, что приводит к большему воздействию на пуансон. Увеличение отношения $D_м/d_{отр}$ от 1,28 до 1,4 увеличивает самоцентрирование пуансона относительно матрицы.

Повышение отношения $D_м/d_{пуан}$ ведет к снижению смещения Δ оси пуансона к оси матрицы (см. рис. 11).

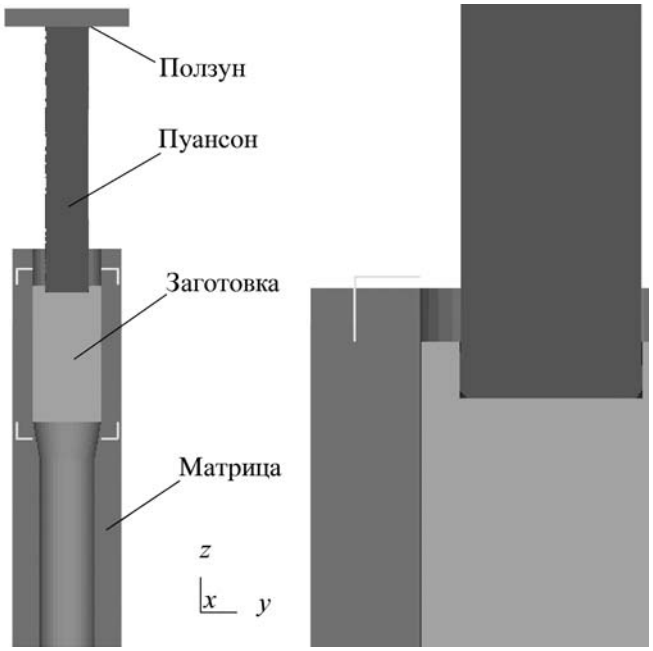


Рис. 12. Схема комбинированного выдавливания

При уменьшении диаметра пуансона $d_{пуан}$ и фиксированном отношении $D_м/d_{отр}$ более интенсивное течение металла происходит в стенку "стакана". Таким образом, чем больше толщина стенки выдавливаемого "стакана", тем вероятней отсутствие эффекта самоцентрирования пуансона относительно матрицы при выдавливании.

Следующим шагом исследования было моделирование в программном комплексе DEFORM-3D процесса эксцентричного выдавливания с применением расчета инструмента на прочность. Цель моделирования – определение возможности его применения для определения эффекта самоцентрирования пуансона относительно матрицы. Это позволит сократить затраты и увеличить число натурных экспериментов (за счет увеличения числа уровней варьирования факторов).

Процесс максимально приближен к натурному эксперименту со следующими допущениями:

– моделировался процесс горячей штамповки с нагревом заготовки до 1200 °С (в натурном эксперименте осуществляли холодное выдавливание заготовок из свинца, которое моделирует процесс горячей штамповки);

– материал заготовки AISI–1060 (американский аналог стали 60).

Выдавливание проводили по той же схеме комбинированного выдавливания (см. рис. 2), на верхнем торце заготовки было выполнено направляющее углубление, ось которого имеет эксцентриситет относительно оси заготовки. В это углубление устанавливали пуансон, также имеющий возможность самопроизвольного смещения в поперечном направлении.

Помимо основного расчета моделирования (формоизменения металла, расчет силы деформирования, температур, деформаций и т.п.) была использована функция расчета инструмента на прочность. Расчет инструмента на прочность подразумевает применение для тела инструмента упругой характеристики материала. Для пуансона была выбрана упругая характеристика материала, это дает возможность наблюдать даже малую деформацию; для заготовки – пластичная характеристика материала; для матрицы и ползуна – абсолютно жесткая характеристика материала. Заданы следующие граничные условия: установлен контакт между ползуном и пуансоном (рис. 12); ползуну было задано движение с требуемой скоростью только по вертикальной оси z, по которой происходило деформирование.

Процесс моделирования был максимально приближен к натурному эксперименту. В соответствии с выбранным планом $2^{6-3}//8$ промоделировано 8 опытов (см. табл. 2). В результате обработки данных математического эксперимента получено следующее уравнение регрессии в натуральном масштабе [2]:

$$\Delta = -4{,}299 + 0{,}00987X_1 - 0{,}0221X_2 + \\ + 0{,}692X_3 - 15{,}3X_4 + 2{,}133X_5 - \\ - 0{,}172X_6 + 1{,}28X_2X_4. \quad (3)$$

Анализ двух математических моделей показал, что характер изменения графиков совпадает. При моделировании наблюдается изменение угла наклона графиков. Тенденции влияния исследуемых факторов на смещение Δ, а следовательно, и на разностенность сохранились.

Отличие результатов при натурных экспериментах и моделировании можно объяснить тем, что при моделировании нельзя учесть технологические особенности, существенно влияющие на процесс, такие как:

- неравномерность нанесения и расходования смазочного материала;
- нежесткость станины;
- неравномерность нагрева по сечению заготовки в зависимости от диаметра;
- интенсивность упрочнения металла в процессе деформирования.

При соосном расположении пуансона и матрицы оценить наличие разностенности в моделировании не представляется возможным (оценка этого параметра не предусмотрена). Однако для качественного анализа поставленной задачи и выбора технологических параметров с точки зрения оптимального процесса программный комплекс может быть применен.

Результаты, полученные при натурных экспериментах и моделировании, а также рассчитанные по полученным уравнениям регрессии, приведены в табл. 3–6.

3. Результаты, полученные при натурных экспериментах и моделировании

Номер опыта	$\Delta_{эксп}$	$\Delta_{мод}$
1	1,7	1,2
2	0,23	0,06
3	–0,6	0,28
4	–0,01	0,16
5	0,85	0,31
6	0,12	0,09
7	–0,7	–0,03
8	0,02	–0,05

4. Результаты, рассчитанные по построенным уравнениям регрессии на основании натурных опытов и моделирования

Номер опыта	$\Delta_{расч\ (эксп)}$	$\Delta_{расч\ (мод)}$
1	1,02	1,18
2	0,19	0,08
3	0,31	0,56
4	–0,21	–0,12
5	–0,06	0,03
6	0,32	0,37
7	–0,01	–0,01
8	0,05	–0,076

5. Результаты, полученные при натурных экспериментах и рассчитанные по построенному уравнению регрессии на основании натурных опытов

Номер опыта	$\Delta_{эксп}$	$\Delta_{расч}$
1	1,7	1,02
2	0,23	0,19
3	–0,6	0,31
4	–0,01	–0,21
5	0,85	–0,06
6	0,12	0,32
7	–0,7	–0,01
8	0,02	0,05

Выводы по полученным данным математической модели процесса в программном комплексе DEFORM-3D с учетом экспериментальных данных:

1. Планирование многофакторного физического эксперимента (см. рис. 4 и 5) по выдавливанию стакана из заготовки с эксцентриситетом установки пуансона позволило построить математическую модель (2), описывающую смещение пуансона в процессе выдавливания. Факторами, входящими в модель, помимо эксцентриситета установки пуансона являются диаметр матрицы, угол конусности матрицы, относительная высота заготовки, соотношение диаметров ступенчатой полости матрицы, отношение диаметра матрицы к диаметру пуансона.

6. Результаты, полученные при моделировании и рассчитанные по построенному уравнению регрессии на основании моделирования

Номер опыта	$\Delta_{мод}$	$\Delta_{расч}$
1	1,2	1,18
2	0,06	0,08
3	0,28	0,56
4	0,16	–0,12
5	0,31	0,03
6	0,09	0,37
7	–0,03	–0,01
8	–0,05	–0,076

2. Математическая модель (2) на основе физического эксперимента удовлетворительно (на качественном уровне) описала результаты проведенных опытов (см. табл. 5): в тех опытах, где происходило центрирование пуансона в процессе выдавливания, модель отразила это центрирование. Таким образом, эта математическая модель позволяет расчетом по ней оптимизировать значения факторов для центрирования пуансона при выдавливании.

Поскольку построенная математическая модель правильно отражает данные физических опытов (см. табл. 5), она может быть использована для данных, полученных с помощью программного комплекса DEFORM-3D.

3. Освоенная методика планирования многофакторных экспериментов привела к предложению провести верификацию программного комплекса DEFORM-3D путем сравнения между собой двух математических моделей: построенной по данным физического эксперимента (2) и описанной в 1-м и 2-м выводах, а также построенной по данным, полученным на основе программного комплекса DEFORM-3D (4) при тех же значениях влияющих на процесс факторов (см. 1-й вывод). Вторая из указанных выше моделей названа моделью математического эксперимента.

4. Сравнение данных, получаемых расчетом по моделям физического (2) и математического (4) экспериментов, показало их удовлетворительное качественное совпадение между собой: в тех случаях, когда математическая модель физического эксперимента указывает на центрирование пуансона в процессе выдавливания, на это же указывает математическая модель математического эксперимента (см. табл. 4).

5. Количественный анализ данных физического и математического экспериментов (см. табл. 5 и 6) с

данными, рассчитанными по построенным для них моделям, показал, что количественное совпадение не очень высокое. Оно не превышает совпадения в табл. 4. Поэтому целесообразно в дальнейшем полагаться только на качественное совпадение между собой данных, рассчитанных по моделям. При этом признать, что программный комплекс DEFORM-3D прошел верификацию для решения поставленной в данной работе задачи.

6. С использованием программного комплекса DEFORM-3D и основной методики планирования многофакторных экспериментов целесообразно провести новый математический эксперимент с варьированием факторов на трех уровнях и учетом взаимного влияния факторов. Этот математический эксперимент будет включать в себя 27 опытов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Способ** изготовления полых цилиндрических деталей: а. с. СССР № 1522070 / А.М. Дмитриев, Д.А. Дмитренко, В.М. Гришин и др. Бюллетень изобретений. 1991. № 3.

2. **Новик Ф.С., Арсов Я.Б.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.

Тимофей Вячеславович Денищев, аспирант,
d_tima@mail.ru;
Александр Михайлович Дмитриев, д-р техн. наук;
Наталья Васильевна Коробова, д-р техн. наук;
Николай Евгеньевич Попов, главный металлург

УДК 621.9

О.И. Кутилова, С.Ф. Магницкая, И.Н. Фролова
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

К вопросу выбора метода получения заготовки

Предложено построение матрицы планов обработки для автоматизации процесса назначения потенциального метода получения заготовки на примере детали типа "тело вращения".

Ключевые слова: матрица планов обработки; технологический процесс; заготовка; припуск.

Construction of matrix for automation of process assigning of potential method of preforming by example circular part is presented.

Keywords: matrix for automation of process; workflow; billet; allowance.

На получение диаметральных размеров заготовки влияют точность исходных данных конструкторских размеров и наличие погрешностей расположения. Размеры диаметров заготовки рассчитывают исходя из последовательности обработки элементарных поверхностей в соответствии с этапностью путем наложения припусков, начиная от конструкторского размера. При этом учитывают изменения положения базовой оси, которые происходят из-за наличия погрешностей расположения. Диаметральные размеры заготовки всегда относятся к одной элементарной поверхности детали и образуют размерную связь между выполняемым и предшествующим переходами через значения минимального припуска и допуска предшествующего перехода.

При определении размеров длин – линейных размеров заготовки задача усложняется тем, что конструкторские базы – торцовые поверхности и положение большинства других поверхностей и элементов детали связаны с ней и между собой расстояниями (размерами положения) и в процессе обработки размерные связи могут изменяться, приобретая технологическую наследственность. Возникает многовариантность в выборе баз для линейных размеров и многокритериальная оптимизация технологического и (или) конструкторского решений по их назначению. При этом целесообразен переход к структурно-модульному принципу проектирования на основе создания отдельных конструкторско-технологических решений, позволяющих обеспечить автоматизацию отдельных элементов *технологического процесса* (ТП) и ТП в целом и создать изделие с заданными параметрами и свойствами.

При структурно-модульном подходе любую систему (ТП, его составные части и т.п.) можно рассматривать как упорядоченное множество конечного числа простых технологических приемов проектирования. При использовании такого принципа проектирования любая сложная система может быть структурирована на элементы, которые в свою очередь разбиваются на вложенные в них элементы, вплоть до элементарно простого.

Так, отдельные частные (единичные) количественные показатели *технологичности конструкции изделия* (ТКИ) могут характеризовать отдельные свойства технологичности детали: по коэффициенту технологичности при оценке точности размеров поверхностей детали можно определить точность размеров и потенциальный метод получения заготовки.

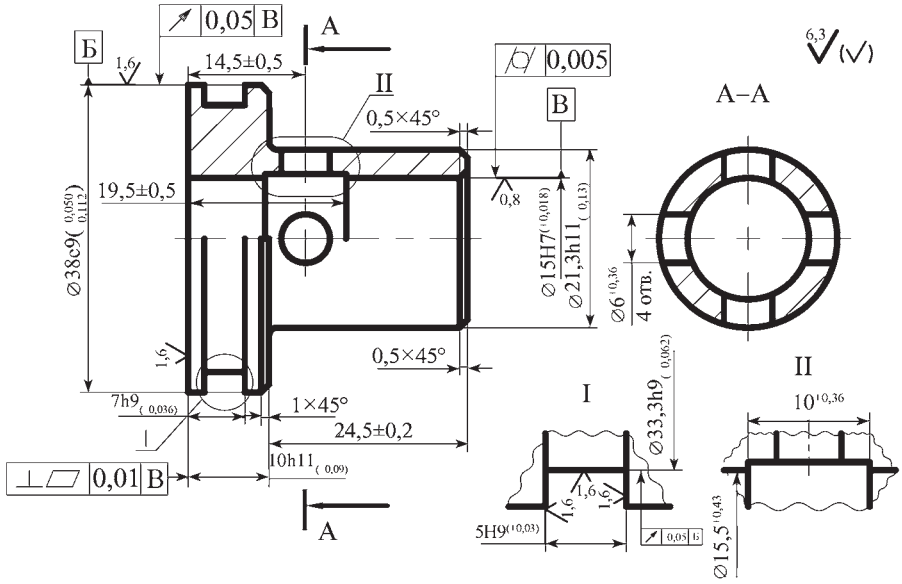


Рис. 1. Деталь "седло"

Конструкции заготовок по форме, геометрическим размерам и установленным на них отклонениям, по параметрам качества поверхностного слоя (шероховатости и волнистости), механическим свойствам, химическому составу следует получать максимально приближенными к готовой детали.

При автоматизации процесса назначения потенциально возможного метода получения заготовки предлагается сформировать *матрицу планов обработки*. В качестве примера рассмотрено формирование этой матрицы, как некоторой системы, с использованием геометрической математической модели детали "седло" (рис. 1). Проектирование матрицы планов обработки осуществляется созданием элементарных технологических модулей.

Геометрическая математическая модель конструкции детали содержит структурную информацию, необходимую для формирования матрицы планов обработки. Ее формирование проводим в два этапа.

Этап 1

1. Необходимо сформировать *коды геометрических элементов и поверхностей детали* "седло": все поверхности и геометрические элементы детали нумеруются слева направо (рис. 2), начиная с крайнего левого торца.

2. Далее формируется *матрица геометрических элементов и поверхностей детали* (табл. 1). Строки матрицы представляют собой номер геометрического элемента или код поверхности детали "седло", столбцы матрицы – виды поверхностей и виды геометрических элементов детали. В последних двух столбцах матрицы приведены обозначения геометрических элементов и поверхностей детали.

Для проверки правильности сформированной матрицы все геометрические элементы и поверхно-

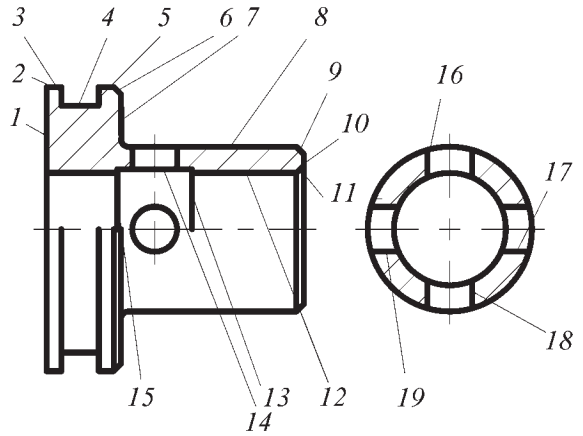


Рис. 2. Формирование кодов поверхностей и геометрических элементов детали

1. Матрица геометрических элементов и поверхностей детали

Код геометрического элемента	Вид геометрических элементов и поверхностей						Обозначение геометрических элементов и поверхностей	
	ТП	ЦП	ОЦП	КП	ВКП	РКП	Поверхность	Ось
1	1						$НТП_1$	
2		1	1				$НЦП_2$	$ОЦП_2$
3	1						$НТП_3$	
4		1	1				$НЦП_4$	$ОЦП_4$
5	1						$НТП_5$	
6				1		1	$НКП_6$	
7	1						$НТП_7$	
8		1	1				$НЦП_8$	$ОЦП_8$

Код геометрического элемента	Вид геометрических элементов и поверхностей						Обозначение геометрических элементов и поверхностей	
	ТП	ЦП	ОЦП	КП	ВКП	РКП	Поверхность	Ось
9				1		1	$НКП_9$	
10	1						$НТП_{10}$	
11				1		1	$ВКП_{11}$	
12		1	1				$ВЦП_{12}$	$ОЦП_{12}$
13	1						$ВТП_{13}$	
14		1	1				$ВЦП_{14}$	$ОЦП_{14}$
15	1						$ВТП_{15}$	
16		1	1				$ВЦП_{16}$	$ОЦП_{16}$
17		1	1				$ВЦП_{17}$	$ОЦП_{17}$
18		1	1				$ВЦП_{18}$	$ОЦП_{18}$
19		1	1				$ВЦП_{19}$	$ОЦП_{19}$
Сумма	7	9	9	3	0	3	–	

Обозначения: НТП и ВТП – наружная и внутренняя торцовые поверхности; НЦП и ВЦП – наружная и внутренняя цилиндрические поверхности; НКП и ВКП – наружная и внутренняя конусные поверхности; ОЦП – ось цилиндрической поверхности.

сти детали суммируются. Сумма показывает количество каждого геометрического элемента и поверхностей на детали. На рассматриваемой детали "седло" – торцовых поверхностей – 7, цилиндрических поверхностей – 9, осей цилиндрических поверхностей – 9, конических поверхностей – 3.

3. Далее формируется *матрица смежности поверхностей* (табл. 2), по которой выявляется конструктор-

2. Матрица смежности поверхностей

Поверхность	$НТП_1$	$НЦП_2$	$НТП_3$	$НЦП_4$	$НТП_5$	$НКП_6$	$НТП_7$	$НЦП_8$	$НКП_9$	$ВЦП_{17}$	$ВЦП_{18}$	$ВЦП_{19}$
$НТП_1$		1										
$НЦП_2$	1		1		1	1						
$НТП_3$		1		1								
$НЦП_4$			1		1							
$НТП_5$		1		1								
$НКП_6$		1					1					
$НТП_7$						1		1				
$НЦП_8$							1		1	1	1	1
$НКП_9$								1				
$НТП_{10}$									1			
$ВКП_{11}$												
$ВЦП_{12}$	1											
$ВТП_{13}$												
$ВЦП_{14}$										1	1	1
$ВТП_{15}$												
$ВЦП_{16}$								1				
$ВЦП_{17}$								1				
$ВЦП_{18}$								1				
$ВЦП_{19}$								1				
Сумма связей	2	4	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2

3. Матрица углов связей

Поверхность	НТП$_1$	НЦП$_2$	НТП$_3$	НЦП$_4$	НТП$_5$	НКП$_6$	НТП$_7$	НЦП$_8$	НКП$_9$	ВЦП$_{17}$	ВЦП$_{18}$	ВЦП$_{19}$
НТП$_1$		270°										
НЦП$_2$	270°		270°		270°	225°						
НТП$_3$		270°		90°								
НЦП$_4$			90°		90°							
НТП$_5$		270°		90°								
НКП$_6$		225°					225°					
НТП$_7$						225°		90°				
НЦП$_8$							90°		225°	270°	270°	270°
НКП$_9$								225°				
НТП$_{10}$									225°			
ВКП$_{11}$												
ВЦП$_{12}$	270°											
ВТП$_{13}$												
ВЦП$_{14}$										270°	270°	270°
ВТП$_{15}$												
ВЦП$_{16}$								270°				
ВЦП$_{17}$								270°				
ВЦП$_{18}$								270°				
ВЦП$_{19}$								270°				

ская концентрация обработки поверхностей детали, обусловленная точностью расположения и последовательностью сочетаний поверхностей.

Две поверхности называются смежными, если имеют в пространстве общее ребро. Любая поверхность на детали может иметь различное число смежных поверхностей. Наличие смежности поверхностей определяет конструкторскую связь поверхностей детали.

Заполненные клетки в матрице смежностей поверхностей требуют определить угол связи.

4. По матрице смежности поверхностей формируется *матрица углов связей* (табл. 3). В матрице проставляются значения внешних углов связей между поверхностями детали, углов между смежными поверхностями, измеренных вне тела детали вдоль одной координатной оси.

Все поверхности на детали делятся на следующие виды:

1) элементарные (Э), имеющие внешний угол связи больше 180°;

2) совмещенные, имеющие внешний угол связи меньше 180°. Совмещенные поверхности делятся на:

– совмещенные (С), имеющие одну смежную поверхность с внешним углом связи меньше 180°;

– сильно совмещенные (СС), имеющие несколько смежных поверхностей с внешним углом связи меньше 180°.

5. Для выявления вида совмещений анализируется матрица углов связи и строится *матрица совмещений* (табл. 4). Единицы ставятся в клетках, где угол связи между смежными поверхностями меньше 180°.

Перебор в матрице совмещений осуществляется по столбцам. Сумма числа связей показывает вид совме-

4. Матрица совмещений

Поверхность	НТП$_1$	НЦП$_2$	НТП$_3$	НЦП$_4$	НТП$_5$	НКП$_6$	НТП$_7$	НЦП$_8$	НКП$_9$	ВЦП$_{17}$	ВЦП$_{18}$	ВЦП$_{19}$
НТП$_1$												
НЦП$_2$												
НТП$_3$				1								
НЦП$_4$			1		1							
НТП$_5$				1								

Поверхность	НТП$_1$	НЦП$_2$	НТП$_3$	НЦП$_4$	НТП$_5$	НКП$_6$	НТП$_7$	НЦП$_8$	НКП$_9$	ВЦП$_{17}$	ВЦП$_{18}$	ВЦП$_{19}$
НКП$_6$												
НТП$_7$								1				
НЦП$_8$							1					
НКП$_9$												
НТП$_{10}$												
ВКП$_{11}$												
ВЦП$_{12}$												
ВТП$_{13}$												
ВЦП$_{14}$												
ВТП$_{15}$												
ВЦП$_{16}$												
ВЦП$_{17}$												
ВЦП$_{18}$												
ВЦП$_{19}$												
Сумма связей	0	0	1	2	1	0	1	1	0	0	0	0
Совмещения	Э	Э	С	СС	С	Э	С	С	Э	Э	Э	Э

щения: сильно совмещенные поверхности имеют сумму, равную 2, совмещенные поверхности – 1, элементарные поверхности – 0.

В результате построения матрицы совмещений видно, что деталь имеет две сильно совмещенные поверхности (НЦП$_4$, ВЦП$_4$) и шесть совмещенных поверхностей (НТП$_3$, НТП$_5$, НТП$_7$, НЦП$_8$, ВТП$_{13}$, ВТП$_{15}$). Остальные поверхности детали являются элементарными.

Анализируя матрицы смежности (на сочетание смежных поверхностей) и совмещений (на наличие совмещенных поверхностей) поверхности детали делятся на основные и неосновные поверхности.

Наиболее распространенные неосновные поверхности на детали типа "тело вращения" – это канавки, шпоночные пазы, шлицы, лыски и т.п.

Выявление основных поверхностей детали позволяет сформировать не только последовательность обработки детали, но и форму заготовки.

Сочетание смежных поверхностей в последовательности НЦП$_2$–НТП$_3$–НЦП$_4$–НТП$_5$–НЦП$_2$ и НЦП$_{12}$–НТП$_{13}$–НЦП$_{14}$–НТП$_{15}$–НЦП$_{12}$ характерно для неосновных поверхностей – канавок.

Сочетание смежных цилиндрических поверхностей в последовательности $НЦП_7 - \begin{matrix} ВЦП_{16} \\ ВЦП_{17} \\ ВЦП_{18} \\ ВЦП_{19} \end{matrix} - ВЦП_{14}$ (т.е. смежны три цилиндра) указывает на то, что поверхности отверстий ВЦП$_{16}$, ВЦП$_{17}$, ВЦП$_{18}$, ВЦП$_{19}$ являются неосновными. Эти поверхности должны быть выполнены после окончательно обработанных основных поверхностей НЦП$_7$ и ВЦП$_{14}$.

Таким образом, на детали имеется шесть неосновных поверхностей: канавок – две (внутренняя и наружная) и отверстий – четыре.

6. По геометрической математической модели детали строится *матрица значений линейных размеров* (табл. 5) между геометрическими элементами и поверхностями детали. Рассматриваются поверхности торцовые, оси цилиндрических поверхностей, ребра конических поверхностей.

7. По матрице значений линейных размеров строится *матрица потенциальных корней линейных размеров* (табл. 6): если в табл. 5 есть линейный размер, то в табл. 6 в той же клетке ставится 1.

Торцовая поверхность, от которой задано наибольшее число линейных размеров (конструкторская база в линейном направлении), называется корнем линейных размеров.

По матрице потенциальных корней линейных размеров выявляются поверхности, имеющие наибольшее число размерных связей (последняя строка матрицы). Эти поверхности и являются потенциальными корнями линейных размерных связей.

Для рассматриваемого примера корнем линейных размеров является наружная торцовая поверхность – НТП$_1$, так как имеет наибольшую сумму числа линейных размерных связей.

8. По геометрической математической модели детали строится *матрица значений диаметральных размеров* (табл. 7).

5. Матрица значений линейных размеров

Поверхность	НТП$_1$	НТП$_3$	НТП$_5$	РКП$_{61}$	НТП$_7$	РКП$_{91}$	НТП$_{10}$	РКП$_{112}$	ВТП$_{13}$	ВТП$_{15}$	ОЦП$_{16}$	ОЦП$_{18}$	ОЦП$_{19}$
НТП$_1$			7		10				14,5		14,5	14,5	14,5
НТП$_3$			5		8								
НТП$_5$	7	5											
РКП$_{61}$					1								
НТП$_7$	10	8		1			24,5						
РКП$_{91}$							1						
НТП$_{10}$					24,5	1		1					
РКП$_{112}$							1						
ВТП$_{13}$	19,5									10			
ВТП$_{15}$									10				
ОЦП$_{16}$	14,5												
ОЦП$_{17}$	14,5												
ОЦП$_{18}$	14,5												
ОЦП$_{19}$	14,5												

6. Матрица потенциальных корней линейных размеров

Поверхность	НТП$_1$	НТП$_3$	НТП$_5$	РКП$_{61}$	НТП$_7$	РКП$_{91}$	НТП$_{10}$	РКП$_{112}$	ВТП$_{13}$	ВТП$_{15}$	ОЦП$_{16}$	ОЦП$_{18}$	ОЦП$_{19}$
НТП$_1$			1		1				1		1	1	1
НТП$_3$			1		1								
НТП$_5$	1	1											
РКП$_{61}$					1								
НТП$_7$	1	1		1			1						
РКП$_{91}$							1						
НТП$_{10}$					1	1		1					
РКП$_{112}$							1						
ВТП$_{13}$	1									1			
ВТП$_{15}$									1				
ОЦП$_{16}$	1												
ОЦП$_{17}$	1												
ОЦП$_{18}$	1												
ОЦП$_{19}$	1												
Сумма связей	7	2	2	1	4	1	3	1	1	1	1	1	1

7. Матрица значений диаметральных размеров

Поверхность	ОЦП$_2$	ОЦП$_4$	ОЦП$_8$	ОЦП$_{12}$	ОЦП$_{14}$	ОЦП$_{16}$	ОЦП$_{17}$	ОЦП$_{18}$	ОЦП$_{19}$
НЦП$_2$	19								
НЦП$_4$		16,65							
НЦП$_8$			10,65						
ВЦП$_{12}$				7,5					
ВЦП$_{14}$					7,75				
ВЦП$_{16}$						3			
ВЦП$_{17}$							3		
ВЦП$_{18}$								3	
ВЦП$_{19}$									3

Этап 2

1. Вторым этапом при составлении матрицы планов обработки является формирование *матрицы квалитетов* (табл. 8):

а) квалитеты размеров торцевых поверхностей (линейных размеров) определяются от потенциального корня линейных размеров. Корень линейных размеров $НТП_1$ не имеет квалитета, и ему присваивается код ноль. Затем последовательно рассматриваются размерные связи от корня линейных размеров. Если размерная связь имеет допуск, то он присваивается размеру торцовой поверхности. Если допуск не указан, то торцовая поверхность считается свободной – ее точность определена грубым квалитетом.

б) квалитеты размеров цилиндрических поверхностей детали вносятся в матрицу последовательно с геометрической математической модели детали. Если точность цилиндрических поверхностей детали определена квалитетами с IT5 по IT12, то цилиндрические поверхности являются посадочными. Поверхности детали, имеющие квалитеты грубее IT12, являются свободными цилиндрическими поверхностями.

8. Матрица квалитетов

Поверхность	Номинал	Квалитет (код)	Вид поверхности	Обозначение поверхности
$НТП_1$	0		1	$НТП_1^0$
$НЦП_2$	38	9	1	$НЦП_2^9$
$НТП_3$	5	9	1	$НТП_3^9$
$НЦП_4$	33,3	9	1	$НЦП_4^9$
$НТП_5$	7	9	1	$НТП_5^9$
$РКП_{61}$	1	14		$РКП_{61}^{14}$
$НТП_7$	10	11	1	$НТП_7^{11}$
$НЦП_8$	21,3	12	1	$НЦП_8^{12}$
$РКП_{91}$	1	15		$РКП_{91}^{14}$
$НТП_{10}$	24,5	14		$НТП_{10}^{14}$
$РКП_{112}$	1	14		$РКП_{112}^{14}$
$ВЦП_{12}$	15	7	1	$ВЦП_{12}^{7}$
$ВТП_{13}$	19,5	14		$ВТП_{13}^{14}$
$ВЦП_{14}$	15,5	14		$ВЦП_{14}^{14}$
$ВТП_{15}$	10	14		$ВТП_{15}^{14}$
$ВЦП_{16}$	6	14		$ВЦП_{16}^{14}$
$ОЦП_{16}$	14,5	14		$ОЦП_{16}^{14}$
$ВЦП_{17}$	6	14		$ВЦП_{17}^{14}$
$ОЦП_{17}$	14,5	14		$ОЦП_{17}^{14}$
$ВЦП_{18}$	6	14		$ВЦП_{18}^{14}$
$ОЦП_{18}$	14,5	14		$ОЦП_{18}^{14}$
$ВЦП_{19}$	6	14		$ВЦП_{19}^{14}$
$ОЦП_{19}$	14,5	14		$ОЦП_{19}^{14}$
Сумма	–	–	8	–
Средний квалитет		12		

Примечание: "1" – поверхность детали является посадочной.

9. Матрица планов обработки

Поверхность	Поверхности заготовки	Эчр	Эпч	Эч	Эп	Эв	Эов
		IT13–12	IT11	IT10–9	IT8–7	IT6	IT5–4
$НТП_1^0$	1	1	1	1	1		
$НЦП_2^9$	1	1	1	1			
$НТП_3^9$		1	1	1			
$НЦП_4^9$		1	1	1			
$НТП_5^9$		1	1	1			
$НКП_6^{14}$		1					
$НТП_7^{11}$	1	1	1				
$НЦП_8^{11}$	1	1	1				
$НКП_9^{14}$		1					
$НТП_{10}^{14}$	1	1					
$ВКП_{11}^{14}$		1					
$ВЦП_{12}^{7}$		1	1	1	1		
$ВТП_{13}^{14}$		1					
$ВЦП_{14}^{14}$		1					
$ВТП_{15}^{14}$		1					
$ВЦП_{16}^{14}$		1					
$ВЦП_{17}^{14}$		1					
$ВЦП_{18}^{14}$		1					
$ВЦП_{19}^{14}$		1					

Обозначения: Эчр – черновой этап обработки; Эпч – получистовой этап обработки; Эч – чистовой этап обработки; Эп – этап обработки повышенной точности; Эв – этап обработки высокой точности; Эов – этап обработки особо высокой точности.

Примечание: "1" – присутствие поверхности на заготовке и наличие этапов обработки.

2. Формируется *матрица планов обработки* (табл. 9) для всех поверхностей детали. Матрица учитывает количество снимаемых припусков с поверхностей детали в зависимости от квалитетов, устанавливающих стадии (этапы) обработки поверхностей по ходу ТП. Конфигурацию заготовки определяет конструктор. Заготовка для детали "седло" по конструктивным формам максимально приближена по форме к форме готовой детали, на которой есть следующие поверхности: $НТП_1^0$, $НЦП_2^9$, $НТП_7^{11}$, $НЦП_8^{11}$ и $НТП_{10}^{14}$.

3. Оценивается точность детали по коэффициенту технологичности. Для этого рассчитывают средний квалитет детали и по нему назначают точность заготовки. Метод изготовления заготовки выбирают для конкретного вида производства, учитывая объем выпуска деталей, технологическую характеристику материала, его физико-механические свойства, размеры и массу детали, наличие оборудования. Назначенный метод должен обеспечивать получение заготовки требуемой точности.

Построение матрицы планов обработки и оценка технологичности детали по квалитету позволит автоматизировать процесс выбора метода получения заготовки и назначение ее точности с выдачей цифровой и графической информации и принятием решения об использовании конкретного вида заготовки, обладающей экономически целесообразным КИМ.

Оксана Игоревна Кутилова, ст. преподаватель;
Светлана Фёдоровна Магницкая, доцент;
Ирина Николаевна Фролова, канд. техн. наук,
fririnik@mail.ru

УДК 641.544

С.Н. Сысоев, Р.А. Никитин *(Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)*

Камерное захватное устройство для транспортировки бухты медной трубки упорядоченной намотки

Рассмотрено новое пневмомеханическое захватное устройство. Применение структуры многокамерного исполнения с охватывающей камеры рубашкой позволяет снизить удельное давление на захватываемую поверхность изделия при увеличении грузоподъемности. Захватное устройство внедрено в ОАО "Кольчугцветмет" при транспортировке бухт медных труб упорядоченной намотки.

Ключевые слова: пневмомеханическое захватное устройство; многокамерная структура; удельное давление; силовые пластины; бухта труб.

The new pneumatic and mechanical capture is considered. Application of the structure of multichamber gripper device with the covering shirt chamber allows to decrease specific pressure on grasped surface of product with load-carrying capacity increase. The capture is introduced in JSC "Kol'chugtsvetmet" during transportation of coils of ordered winding copper pipes.

Keywords: pneumatic and mechanical capture; multichamber structure; specific pressure; power plates; coil of pipes.

Автоматизация вспомогательных операций (загрузка, выгрузка основного технологического оборудования, транспортировка и укладка штучных заготовок, деталей) является одной из важнейших и сложных задач, решаемых на современных промышленных предприятиях.

Технологический процесс изготовления медной трубки в ОАО "Кольчугцветмет" (г. Кольчугино) включает в себя упорядоченную намотку трубки в бухту массой до 250 кг, транспортирование и упаковку в тару.

Для перемещения бухт применяют мостовой кран с механическим захватом, что не гарантирует сохранение требуемой геометрии трубки из-за возможной деформации поверхности изделия. Это связано с тем, что материал трубки после термической обработки продолжительное время имеет невысокую жесткость.

Существующая технология, оборудование и значительные риски возникновения брака на конечных технологических операциях резко снижают эффективность работы предприятия.

Повышение эффективности производства путем разработки и внедрения захватного устройства для перемещения бухт из трубки упорядоченной намотки, отличающегося низким удельным давлением на рабочую поверхность изделия, является актуальным. Это позволит не только снизить брак, но и увеличить скорость транспортировки бухт, а следовательно, загрузку основного производственного оборудования.

Известно, что для захвата и удержания тонкостенных нежестких изделий, а также изделий, изготовленных из легко разрушаемых материалов, применяют камерные захватные устройства [1, 2], создающие незначительное удельное давление на захватываемую поверхность. Указанные устройства снабжены камерой в виде герметичной оболочки, полость которой сообщена с источником сжатого воздуха. Однако такие устройства обычно применяют при работе с изделиями массой до 0,5 кг.

Для увеличения грузоподъемности захватного устройства разработано новое камерное устройство, по периметру рабочей поверхности которого установлены силовые пластины с защитной оболочкой [3]. Данное устройство может быть выполнено как однокамерным, так и многокамерным.

Применение нескольких последовательно установленных эластичных оболочек снижает удельное давление захвата на поверхность, так как сила удержания перераспределяется и на углубления между выпуклостями. Выполнение нерастяжимой рубашки, охватывающей камерный механизм, например, кордированием ее нерастяжимыми нитями в направлении, противоположном подъему, повышает грузоподъемность, расширяя номенклатуру захватываемых грузов.

Захватное устройство (рис. 1) содержит несущий корпус *1*, на котором жестко закреплены герметичные

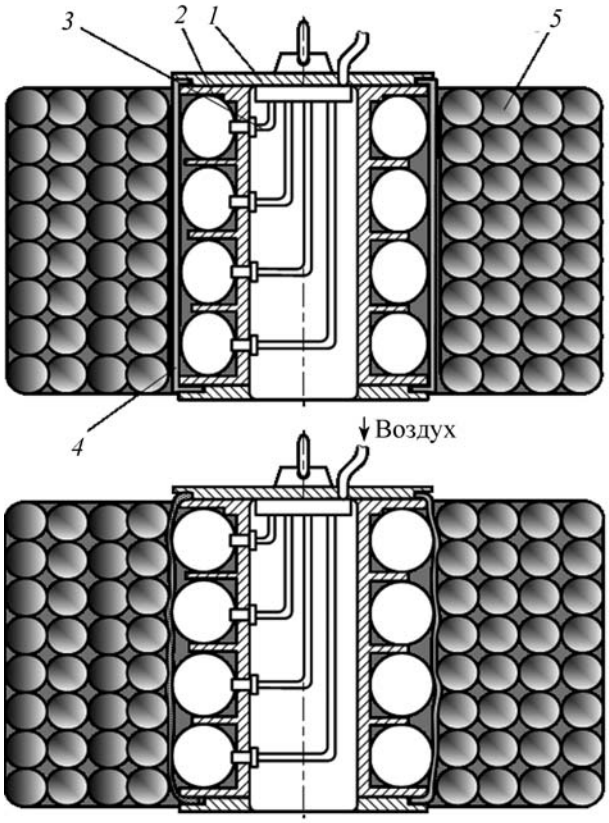


Рис. 1. Схема многокамерного захватного устройства

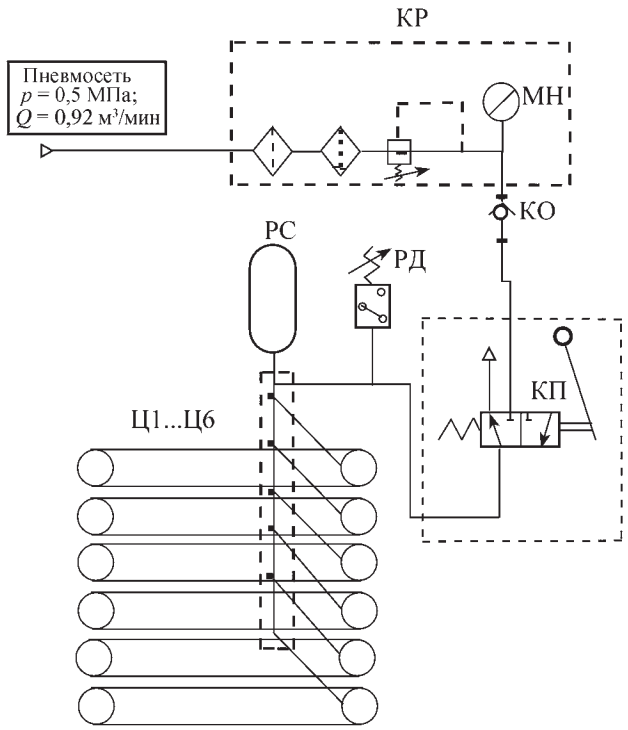


Рис. 2. Пневмосхема захватного устройства:
КР – клапан редукционный; КО – клапан обратный; КП – клапан пневматический с ручным управлением; Ц1...Ц6 – пневмокамеры; РС – ресивер; РД – реле давления; МН – манометр

эластичные оболочки *2*. Полости оболочки *2* сообщены с источником сжатого воздуха трубопроводами *3*. На корпусе *1* жестко закреплена охватывающая эластичные оболочки *2* грузонесущая, выполненная нерастяжимой в вертикальном направлении, рубашка *4*, захватывающая груз *5*.

Устройство работает следующим образом. В исходном положении полости оболочек *2* соединены с атмосферой. Камеры, образованные ими, сжаты и сила удержания груза *5* отсутствует.

Для захвата груза *5* сжатый воздух подается по трубопроводам *3* в полости эластичных оболочек *2*, которые, расширяясь, прижимают грузонесущую рубашку *4* к поверхности транспортируемого изделия. После окончания транспортных операций воздух из полостей эластичных оболочек *2* стравливается и изделие освобождается.

Таким образом, расширяется номенклатура транспортируемых изделий по массе грузов при уменьшении удельного давления на захватываемую поверхность со стороны захвата.

Пневматическая принципиальная схема захвата показана на рис. 2.

Сжатый воздух подается из заводской пневмосети или от автономного компрессора на вход блока подготовки воздуха КР. Блок подготовки воздуха состоит из воздушного фильтра, фильтра влагоотделителя, редукционного клапана и манометра. В зависимости от типа примененной пневмоаппаратуры могут быть установлены различные комбинированные устройства, содержащие в одном корпусе различные по назначению аппараты. На выходе из блока подготовки воздуха установлен обратный клапан КО, предотвращающий падение давления в камерах захвата в случае прекращения подачи воздуха из пневмосети. Клапан КП с ручным управлением служит для подачи воздуха в камеры захвата при зажиме бухты или для выпуска воздуха в атмосферу при разжиме бухты. Ресивер РС служит для компенсации мелких утечек воздуха через соединительные элементы пневмосистемы при работе захвата.

Захватное устройство (рис. 3) состоит из корпуса *1* с закрепленными на нем силовыми пластинами *2* и пневматических камер *3*.

Устройство транспортируется за рым-болт *4*, жестко закрепленный на корпусе, управление осуществляется пневмораспределителем, а через штуцер *6* подается давление пневмопитания. На корпус через пластины и защитную оболочку передаются вес бухты и силы от зажима бухты. Для создания силы удержания бухты в составе захвата предусмотрены пневматические камеры. Для защиты пневматических камер от

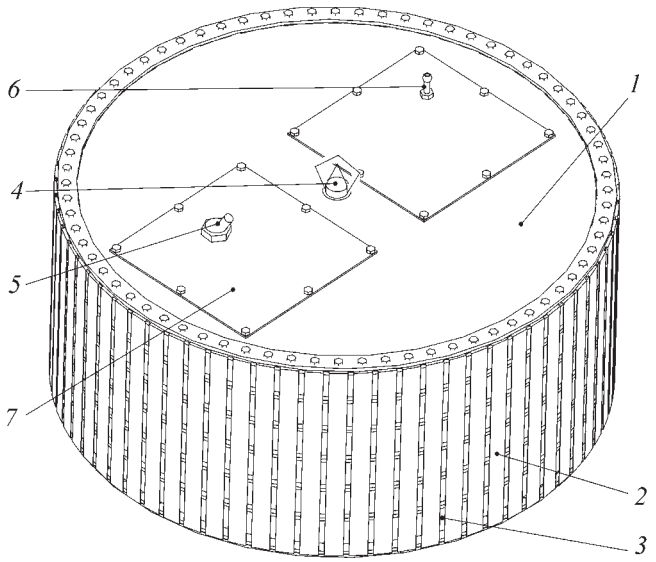


Рис. 3. Общий вид захватного устройства

Рис. 4. Общий вид бухты трубки упорядоченной намотки

Рис. 5. Захват и транспортировка бухты

внешних механических повреждений и для передачи силы удержания на бухту служат пластины и защитная оболочка.

Для оценки работоспособности и эффективности пневмомеханического захвата многокамерного типа проведены его натурные испытания в промышленных условиях. На рис. 4 изображена готовая к транспортированию на следующую технологическую операцию бухта трубок упорядоченной намотки.

На рис. 5 показан процесс перемещения бухты с помощью тельфера захватного устройства.

Промышленные испытания опытного образца камерного захватного устройства, разработанного и созданного во Владимирском государственном университете на кафедре автоматизации технологических процессов, показали его эффективную и надежную работу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сысоев С.Н.** Элементы гидравлического и пневматического оборудования: учеб. пособие. Владимир: ВлГУ, 2001. 92 с.

2. **Пат. 1562291 Российская Федерация, МКИ^3 В 66 С 1/54.** Захватное устройство / В.А. Литвиненко, В.А. Иванов. № 4256164/40; заявл. 13.04.87; опубл. 07.05.90, Бюл. № 17.

3. **Пат. 2409514 Российская Федерация, МКП В 66 С 1/54.** Захватное устройство / С.Н. Сысоев, Ю.В. Черкасов, А.В. Бакутов, Р.А. Никитин. № 2009145335/11; заявл. 07.12.2009; опубл. 20.01.2011, Бюл. № 19.

Сергей Николаевич Сысоев, д-р техн. наук;
Роман Александрович Никитин, аспирант,
niknamerom@mail.ru

УДК 621.791.011

В.С. Муратов *(Самарский государственный технический университет),*
Д.П. Юдаев *(ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", г. Самара)*

Структура и механические свойства сварных соединений из листовых полуфабрикатов сплава 1545К в нагартованном и отожженном состояниях

Определены структура и механические характеристики сварных соединений листовых полуфабрикатов из сплава 1545К, полученные непрерывной автоматической электросваркой в среде защитного газа и контактной точечной сваркой, а также режимы сварки, обеспечивающие получение сварных соединений с требуемым уровнем механических свойств.

Ключевые слова: алюминиевый сплав; сварное соединение; прочность; структура.

The structure and mechanical properties of welded joints of sheet semifinished products of alloy 1545K obtained by continuous automatic electric welding in inert gas and resistance spot welding and the regimes of welding to ensure receipt of welded joints with the required level of mechanical properties are determined.

Keywords: aluminum alloy; weld; strength; structure.

В настоящее время для изготовления сварных герметичных конструкций ракетно-космической техники применяют полуфабрикаты из термически неупрочняемого алюминиевого сплава АМг6. Для изготовления элементов конструкций перспективных ракет-носителей, использующих в качестве одного из компонентов топлива жидкий водород, необходимо применять алюминиевые сплавы с более высокими прочностными, технологическими и эксплуатационными свойствами [1].

Алюминиевый термически неупрочняемый сплав 1545К системы Al–Mg–Sc имеет расширенный диапазон рабочих температур, обладает более высокими механическими характеристиками по сравнению со сплавом АМг6, поэтому рекомендуется для изготовления герметичных баковых конструкций перспективных ракет-носителей.

Высокие механические, технологические и эксплуатационные характеристики полуфабрикатов из сплава 1545К обеспечиваются совместным легированием переходными металлами.

По данным [2], добавки скандия, марганца, хрома и циркония приводят к формированию в деформированных полуфабрикатах из алюминиевых сплавов развитой субзеренной структуры, появлению эффектов дисперсионного упрочнения – в результате выделения дисперсных частиц алюминидов и структурного упрочнения, связанного с сохранением нерекристаллизованной структуры.

Сравнительные механические и эксплуатационные характеристики листов из сплавов АМг6 и 1545К в различных состояниях приведены в табл. 1.

Для применения полуфабрикатов сплава 1545К в сварных конструкциях ракетно- космической техники необходимо определить структуру и механические свойства сварных соединений, выполненных непрерывной автоматической электросваркой в среде защитного газа и контактной точечной сваркой, а также

1. Механические и эксплуатационные свойства листов из сплавов АМг6 и 1545К

Марка сплава	Диапазон рабочих температур, °С	Состояние	Направление вырезки образцов	Механические свойства при 20 °С		
				$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %
				МПа		
АМг6	–196...150	Отожженное	Поперечное	315	155	15
		Нагартованное		372	284	6
1545К	–253...150	Отожженное		400	300	15
		Нагартованное		440	340	12

параметры режима сварки, обеспечивающие получение сварных соединений с требуемым уровнем механических характеристик.

Выбор режима автоматической непрерывной электросварки, обеспечивающего получение качественных сварных соединений. Для изготовления ответственных герметичных сварных конструкций – баков ракет-носителей применяют автоматическую сварку в инертных газах неплавящимся электродом с присадкой (АИНп), обеспечивающую качество шва при высокой производительности [3]. Отработку технологии сварки проводили на образцах, вырезанных из листов сплава 1545К в отожженном и нагартованном состоянии.

Размеры образцов:

– для нагартованного состояния – пластина 4×50×200 мм;

– для отожженного состояния – пластина 4,5×50×200 мм.

Подготовка под сварку – травление с последующей зачисткой шабером. Экспериментальные режимы сварки подбирали исходя из толщины свариваемых листов в соответствии с требованиями отраслевых стандартов аналогично сплаву АМг6.

Для сварки образцов из нагартованных листов сплава 1545К толщиной 4 мм был выбран следующий режим: сварочный ток 230 А; скорость сварки 14 м/ч; расход аргона 12...14 л/мин.

Для сварки образцов из отожженных листов сплава 1545К толщиной 4,5 мм режим сварки: сварочный ток 260 А; скорость сварки 14 м/ч; расход аргона 12...14 л/мин.

В качестве присадочного материала использовали проволоку диаметром 2,5 мм из сплава 1545К.

Из полученных сварных соединений вырезали стандартные образцы для определения механических свойств по ГОСТ 6996–66. Также изготовляли макрошлифы для оценки структуры в зоне сварного шва. Проводили рентгеновский контроль сварных соединений на наличие дефектов.

Металлографическими исследованиями поперечных сечений и рентгеновским контролем установлено: структура сварных стыковых соединений из листовых полуфабрикатов сплава 1545К плотная, без трещин, пористости и других несплошностей (рис. 1).

Результаты испытаний на растяжение образцов сварных соединений из листов сплава 1545К и характеристики сварных соединений из листов сплава

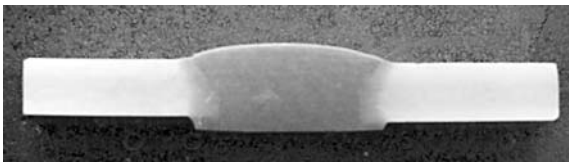


Рис. 1. Макроструктура сварного соединения листов из сплава 1545К, выполненного автоматической непрерывной электросваркой. ×2

2. Характеристики сварных стыковых соединений из листов сплавов АМг6 и 1545К

Марка сплава	Толщина листа, мм	Состояние	Среднее значение $\sigma_в$, МПа
АМг6	4,0	Нагартованное	310
	4,5	Отожженное	290
1545К	4,0	Нагартованное	381
	4,5	Отожженное	376

АМг6 по данным отраслевых стандартов представлены в табл. 2.

Коэффициенты ослабления сварного соединения для различных состояний листов определяли по формуле

$$K_{осл} = \frac{\sigma_в^{св}}{\sigma_в^{осн}},$$

где $\sigma_в^{св}$, $\sigma_в^{осн}$ – временное сопротивление разрыву сварного соединения и основного материала соответственно.

Для сварных соединений, полученных из нагартованных листов из сплава 1545К:

$K_{осл} = \frac{381}{440} = 0{,}87$ (для нагартованных листов из сплава АМг6 $K_{осл}$ = 0,8).

Для сварных соединений, полученных из отожженных листов из сплава 1545К:

$K_{осл} = \frac{376}{400} = 0{,}94$ (для отожженных листов из сплава АМг6 $K_{осл}$ = 0,9).

Выбор оптимального режима контактной точечной сварки и оценка качества сварных соединений. Для определения оптимальных параметров режима контактной точечной сварки листов из сплава 1545К использовали следующие образцы:

– для нагартованного состояния – полоса 4×50×200 мм;

– для отожженного состояния – полоса 4,5×50×200 мм.

Экспериментальный режим сварки для листов в нагартованном состоянии толщиной 4 мм: сварочная сила 20 кН; ковочная сила 35 кН; ступень сварочного трансформатора 5 кА; длительность импульса сварочного тока 0,22 с.

Для листов в отожженном состоянии толщиной 4,5 мм режим сварки: сварочная сила 6 кН; ковочная сила 15 кН; ступень сварочного трансформатора 6 кА; длительность импульса сварочного тока 0,26 с.

Металлографическими исследованиями поперечных сечений (рис. 2) и рентгеновским просвечиванием с применением контрастного материала (ленты из сплава СрА10) сварных точечных соединений из листов сплава 1545К в отожженном и нагартованном со-

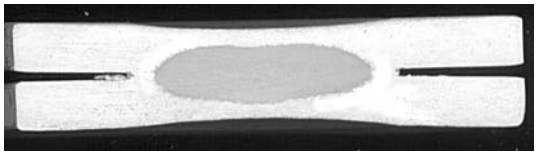


Рис. 2. Макроструктура точечного соединения листов из сплава 1545К. ×2

стояниях установлено: структура сварных точек плотная, без трещин, пористости и других несплошностей.

Диаметры отпечатков сварных точек:

– для нагартованных листов – 19...20 мм;

– для отожженных листов – 21...22 мм.

Минимальные диаметры ядер сварных точек по данным рентгеновского контроля:

– для нагартованных листов – 13 мм;

– для отожженных листов – 12,4 мм.

Механические испытания сварных образцов на срез и отрыв показали, что для сварных соединений, полученных из листов сплава 1545К в нагартованном состоянии, средняя сила при разрушении на срез составляла 23 кН, а средняя сила при разрушении на отрыв – 16 кН.

Для сварных соединений, полученных из листов сплава 1545К в отожженном состоянии, средняя сила при разрушении на срез составляла 26 кН, а средняя сила при разрушении на отрыв – 20 кН.

Механические свойства сварных точечных соединений листов сплава 1545К в 2,5–3 раза выше, чем свойства сварных точечных соединений из листов сплава АМг6 по отраслевым нормам.

Выводы

1. Геометрические параметры и механические свойства сварных соединений листовых полуфабрикатов из алюминиевого сплава 1545К, выполненных автоматической непрерывной электросваркой в среде защитного газа и контактной точечной сваркой, соответствуют требованиям отраслевых стандартов к сварным соединениям. Прочность сварных соединений листов сплава 1545К превосходит прочность аналогичных соединений из листов сплава АМг6.

2. Коэффициенты ослабления сварных соединений отожженных и нагартованных листов из сплава 1545К, выполненных автоматической электросваркой в среде защитного газа, имеют большую величину, чем коэффициенты ослабления сварных соединений листов из сплава АМг6. Это означает, что зоны сварных швов в конструкциях из листов сплава 1545К менее ослаблены по сравнению с основным материалом, чем зоны сварных швов в конструкциях из листов сплава АМг6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Елагин В.И.** Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 9. С. 3–11.

2. **Исследование** совместного влияния скандия на структуру и механические свойства алюминия и его сплавов с магнием / Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, И.Г. Королькова, М.Н. Болотова // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 3. С. 24–27.

3. **Алюминиевые** сплавы (состав, свойства, технология, применение) / В.М. Белецкий, Г.А. Кривов; под общ. ред. академика РАН И.Н. Фридляндера. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.

Владимир Сергеевич Муратов, д-р техн. наук,
muratov@sstu.ru;
Дмитрий Петрович Юдаев, магистр

ООО "Издательство 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, Стромынский пер., д. 4,

тел.: (499) 269-6600, 269-5298, факс: (499) 269-4897,

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 669.14:621.774.3:669.1.017:620.17-18

М.Д. Фукс, Ю.В. Зеленин
(ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей", г. Санкт-Петербург),
С.Ю. Кондратьев *(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)*

Исследование качества металла толстостенных труб из коррозионно-стойких сталей

Исследованы состав, структура и свойства горячедеформированных толстостенных труб ∅610×5000×38 мм для машиностроения и энергетики, впервые изготовленных на российском металлургическом заводе из центробежнолитых заготовок из аустенитной стали 08Х18Н10Т. Установлено, что, несмотря на отклонения в структуре металла труб от требований нормативно-технической документации, механические свойства имеют высокий уровень. Показана возможность совершенствования качества металла отечественных труб.

Ключевые слова: коррозионно-стойкие стали; толстостенные трубы; микроструктура; механические свойства; центробежное литье.

The composition, structure and properties of hot-walled pipes ∅610×5000×38 mm for mechanical and power engineering first produced in the domestic iron and steel plant out of centrifugal casted bars made of austenitic steel 08Kh18N10T are investigated. It is established that the structure of steel pipes does not meet the technical requirements but the mechanical properties have high level. The ways for further development and industrial use of domestic pipes are suggested.

Keywords: corrosion-resistant steels; thick-walled pipes; microstructure; mechanical properties; centrifugal casting.

В настоящее время существует зависимость отечественной промышленности от дорогостоящего импортного оборудования. Например, для каждого трубопровода водородной очистки нефтепродуктов закупается около 400 п.м. труб. Высокая стоимость импортной металлопродукции в значительной степени обусловлена трудоемкостью применяемой технологии: трубу трепанируют из кованой поковки. В связи с этим актуальным является освоение отечественной промышленностью производства толстостенных труб из коррозионно-стойких сталей при снижении стоимости готовой продукции [1, 2].

Цель работы – исследование качества металла бесшовных пятиметровых труб ∅610×38 мм из стали марки 08Х18Н10Т, изготовленных на российском металлургическом заводе из центробежнолитых заготовок с последующей горячей деформацией со степенью укова не менее 2.

Методика проведения исследований. Исследовали бесшовные трубы диаметром 610 мм, длиной 5000 мм и толщиной стенки 38 мм из стали 08Х18Н10Т, полученные методом центробежного литья с последующей горячей деформацией со степенью укова ~2. Комплекс испытаний на соответствие качества металла трубы нормативно-технической документации (НТД) выполняли для каждой трубы, так как при использовании технологии центробежного литья каждая труба является самостоятельным изделием [3, 4].

Исследования металла труб включали в себя: определение химического состава; анализ макроструктуры для выявления усадочной рыхлости, трещин, шлаковых включений; анализ микроструктуры для оценки загрязненности неметаллическими включениями и определения размера зерна; определение количества ферритной фазы в структуре; механические испытания на статическое растяжение при температурах 20 и 500 °С; определение стойкости к межкристаллитной коррозии.

Химический состав металла трубы определяли методом эмиссионного спектрального анализа с использованием автоматизированного оптического спектрометра "СПАС-02" в соответствии с ГОСТ 18895–97.

Макроструктуру металла оценивали по ГОСТ 10243–75. Загрязненность неметаллическими включениями и размеры зерна стали определяли по ГОСТ 1778–70 и ГОСТ 5639–82 соответственно с использованием оптического металлографического микроскопа "Versamet-2". Изготовление и подготовку металлографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы Buehler согласно стандарту ASTM E 3–95.

Макроструктуру выявляли травлением в смеси концентрированных кислот HCl (300 мл) и HNO_3 (100 мл) длительностью 3 мин (перед травлением раствор выдерживали в течение 24 ч). Травление микроструктуры осуществляли в 10%-ном водном растворе щавелевой кислоты в течение 4 мин.

Количество феррита в структуре стали определяли магнитным методом в соответствии с ГОСТ 11878–66.

Механические свойства определяли при статических испытаниях на одноосное растяжение пятикратных цилиндрических образцов d_0 = 6 мм при комнатной температуре по ГОСТ 1497–84 и при 500 °С по

1. Химический состав металла исследованных труб (фактический) и нормированный для стали 08Х18Н10Т по ГОСТ 5632–72, % мас.

Сталь 08Х18Н10Т	C	Cr	Ni	Ti	S	P	Mn	Si
Трубы № 1–38, 40–49, 51–54, 56–61, 63–65	0,04...0,08	17,0...18,7	9,0...10,6	0,42...0,68	0,003...0,013	0,017...0,035	0,21...1,02	0,51...0,80
Трубы № 39, 50, 55, 62	0,05...0,07	17,6...18,5	9,3...10,5	0,11...0,28	0,006...0,011	0,029...0,031	0,51...0,81	0,61...0,80
ГОСТ 5632–72	≤ 0,08	17,0...19,0	9,0...11,0	5С–0,7	≤ 0,020	≤ 0,035	≤ 2,0	≤ 0,80

ГОСТ 9651–84. Испытания проводили на машине "Schenck" с максимальной силой 200 кН при скорости нагружения 1 мм/мин.

Стойкость стали к межкристаллитной коррозии оценивали по методу АМУ ГОСТ 6032.

Всего было исследовано 65 труб.

Результаты исследований и их обсуждение. Получили, что по химическому составу металл труб соответствует стали марки 08Х18Н10Т (табл. 1). Следует отметить единичные случаи отклонения по содержанию титана (до 0,11 % мас.) в составе исследованной стали по сравнению с требованиями НТД (≥ 0,3 % мас.). Пониженное содержание титана в стали может повышать ее склонность к межкристаллитной коррозии. Однако дальнейшие исследования, проведенные для всех труб, не выявили склонности к межкристаллитной коррозии у металла как с пониженным содержанием титана, так и с соответствующим требованиям НТД.

Анализ макроструктуры не выявил в стали усадочной рыхлости, трещин и шлаковых включений (рис. 1, *а*). Примерно в 15 % исследованных труб обнаружена грубая литая дендритная структура, располагающаяся по значительной части (рис. 1, *б*) или по всей толщине стенки (рис. 1, *в*). Можно предположить, что причиной этого является недостаточная степень укова или нарушение технологического регламента при проведении горячей деформации центробежнолитых заготовок труб.

Микроструктурное исследование металла труб выявило следующие закономерности. Балл неметаллических включений, а именно силикатов, в ~15 % исследованных труб превышает 3,5, который является максимально допустимым по требованиям НТД. На рис. 2 показана характерная структура стали труб с загрязненностью силикатами, соответствующей баллу 5.

Максимальные отклонения от требований НТД выявлены при оценке балла зерна стали. Только у двух из 65 труб зерно стали соответствовало баллу 2–3, в то время как требования регламентируют балл зерна 3–7. На рис. 3 приведена характерная микроструктура стали исследованных труб с зерном, соответствующим баллу 0–1 по ГОСТ 5639–82.

Обнаруженные отклонения макро- и микроструктуры стали исследованных труб от требований НТД свидетельствуют о необходимости корректировки и контроля технологии их выплавки и деформации. Эти отклонения в сложных условиях эксплуатации труб – повышенные давление и температура (табл. 2) – могут быть недопустимыми [5].

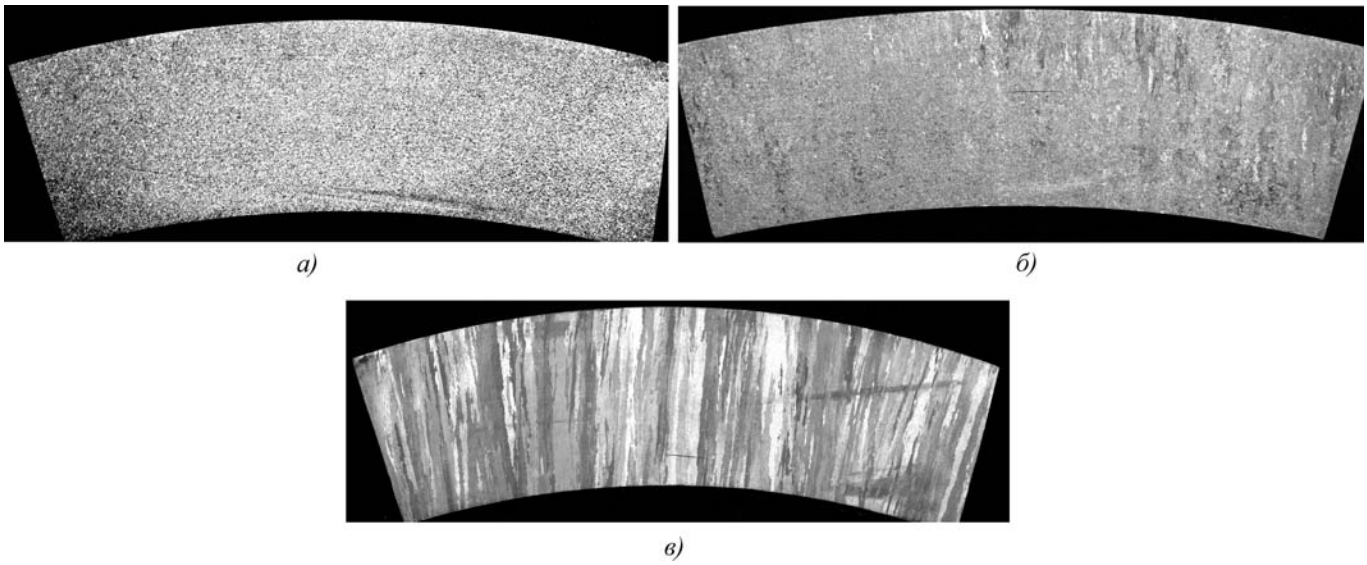


Рис. 1. Макроструктура металла труб № 32 (*а*), 59 (*б*) и 3 (*в*). Масштаб 1,5:1,0

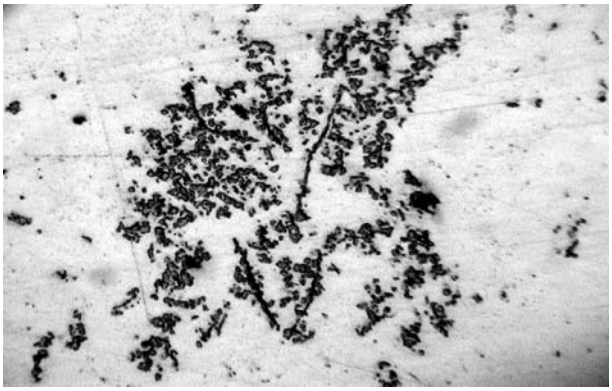


Рис. 2. Микроструктура металла трубы № 6 (нетравленый шлиф). Загрязненность силикатами балл 5. ×100

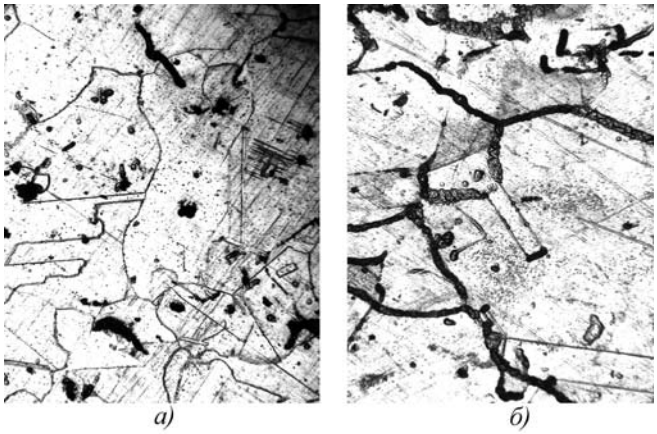


Рис. 3. Микроструктура металла труб № 13 (*а*) и 25 (*б*) с баллом зерна 1 и 0 соответственно. ×100

Количество ферритной фазы в структуре стали составляет 1,5...5,0 % об., что удовлетворяет требованиям НТД.

Важным результатом механических испытаний является практически полное соответствие механических свойств металла исследованных труб требованиям технических условий (табл. 3).

Таким образом, установлено, что исследованный металл имеет отклонения по структуре от требований, предъявляемых к толстостенным коррозионно-стойким трубам. Это не позволяет считать исследованные трубы годными к эксплуатации. Наличие в структуре стали крупнозернистости, литой дендритной структуры и повышенной загрязненности неметаллическими включениями не гарантирует безопасную эксплуатацию трубопровода в течение требуемых 200 тыс. ч. Однако высокие механические свойства и отсутствие склонности к межкристаллитной коррозии металла труб дают основание предположить, что металл труб ограниченно годен к эксплуатации. Для ответа на этот вопрос необходимы дополнительные испытания металла труб.

2. Условия эксплуатации исследованных труб в составе трубопровода

Технологическая ветка	Эксплуатационные параметры		
	Давление, МПа	Температура, °С	Среда
I	3	10	Газо-сырьевая смесь: дизельная фракция + + 80 % ВСГ
II	400	450	

3. Механические свойства металла исследованных труб (фактические) и нормированные для стали 08Х18Н10Т по ТУ 14-3Р-11–2009

Сталь 08Х18Н10Т	Механические свойства		
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
Трубы № 1–65	505...620	195...280	41...68
ТУ 14-3Р-11–2009	≥ 510	≥ 205	≥ 35

Заключение. Отечественной металлургической промышленностью сделан важный шаг по самостоятельному изготовлению высокотехнологичной продукции – толстостенных труб из коррозионно-стойких сталей для машиностроения и энергетики. При этом применена экономичная технология – горячая деформация центробежнолитых заготовок. Для развития этого производства необходима отработка параметров технологии для повышения качества литого и деформированного металла, а также оценка возможности согласования менее жестких требований нормативно-технической документации на готовую продукцию путем проведения дополнительных исследований металла труб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Линчук А.В., Кондратов Л.А.** О развитии производства труб // Сталь. 2011. № 5. С. 45–53.

2. **Хулка К.** Тенденции разработки сталей для труб большого диаметра // Сталь. 1997. № 10. С. 62–66.

3. **Строение** и свойства толстостенной центробежнолитой заготовки из стали 08Х18Н10Т для производства бесшовных труб / В.Н. Заика, А.П. Шлямнев, Г.А. Филиппов, К.В. Захарченко, А.Ф. Шевакин // Сталь. 2011. № 1. С. 67–72.

4. **Особенности** структуры и механические свойства малоуглеродистой стали для производства нефтегазопроводных труб / И.Н. Веселов, И.Ю. Пышминцев, К.А. Лаев, С.Ю. Жукова // Сталь. 2011. № 2. С. 82–87.

5. **Филиппов Г.А., Ливанова О.В.** Взаимодействие дефектов структуры и деградация свойств конструкционных материалов // Материаловедение. 2002. № 10. С. 17–21.

Михаил Дмитриевич Фукс, инженер;
Юрий Владимирович Зеленин, помощник генерального директора;
Сергей Юрьевич Кондратьев, д-р техн. наук,
info@petropromspb.ru

УДК 621.785

В.И. Муравьёв, В.А. Ким, А.В. Фролов, А.М. Мартынюк, А.В. Кириков
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

О резервах традиционных технологий термической обработки сталей на пути повышения эксплуатационных свойств изделий

Приведены результаты работ по выявлению потенциальных возможностей традиционных технологий непрерывной полной объемной закалки, улучшения и изотермической закалки стали 30ХГСА для повышения прочностных и пластических характеристик заготовок в результате подбора оптимальной температуры нагрева под закалку и оптимальной длительности выдержки при этой температуре.

Ключевые слова: закалка; отпуск; улучшение; изотермическая закалка; испытание на сплющивание; механические характеристики.

The experimental data of research the potential resources of the traditional technologies of hardening, martempering and bainitic hardening of steel 30KhGSA in strength and plastic characteristics improvement owing to selection the heating temperature and the heating period are considered.

Keywords: hardening; tempering; martempering; bainitic hardening; flattening test; mechanical properties.

Известно, что режимы закалки оказывают значительное влияние на формирование внутренней дефектной структуры материала и, следовательно, на механические свойства сталей. Снижение температуры нагрева под закалку и сокращение длительности выдержки при этой температуре приводят к замедлению аустенитного превращения и снижению прокаливаемости, а перегрев и более длительная выдержка доэвтектоидных сталей – к росту аустенитного зерна. Поэтому стандарты на режимы термической обработки доэвтектоидных сталей устанавливают температуры нагрева под закалку на 30...50 °С выше точки Ac_3, а длительность выдержки составляет 1...2 мин. ГОСТ 4543–71 предусматривает закалку стали 30ХГСА от температуры (880±15) °С в масле с последующим отпуском при (540±50) °С, при этом считается, что Ac_3 = 830 °С.

Но стандарты на химический состав сталей допускают относительно широкий разброс концентрации легирующих элементов. Так, по ГОСТ 4543–71 химический состав стали 30ХГСА следующий, % мас.: 0,28...0,34 С; 0,9...1,2 Si; 0,8...1,1 Mn; 0,8...1,1 Cr; < 0,03 Ni; < 0,2 W; < 0,15 Mo; < 0,03 Ti; < 0,03 Cu; < 0,025 S; < 0,025 P, т.е. отклонения химического состава составляют: ±10 % С; ±14 % Si; ±16 % Mn; ±16 % Cr.

ГОСТ 4543–71 допускает также в готовом прокате и поковках отклонения по химическому составу 0,01...0,1 % для различных элементов. Указанные изменения химического состава сплава приводят к изменению температуры точки Ac_3 в интервале не менее 830...880 °С. Кроме того, скорость нагрева, зависящая от среды нагрева (воздух, расплав соли и т.д.), также оказывает значительное влияние [1] на процесс аустенизации стали – разница скоростей нагрева заготовки в воздухе и расплаве соли (менее 10 К/с и более 700 К/с соответственно) изменяет температуру начала аустенизации стали до 50 °С.

Таким образом, реальная закалка стали фактически происходит при неоптимальных условиях нагрева под закалку и выдержки при этой температуре – либо с недогревом и малой выдержкой, либо с перегревом и увеличенной выдержкой. Это приводит, соответственно, к незавершенности аустенитного превращения или к чрезмерному росту аустенитного зерна.

В результате получаемые механические характеристики изделий значительно отличаются от потенциально возможных. Поэтому перспективным направлением повышения эффективности технологий закалки являются более точное определение положения точки Ac_3 в каждой партии закаливаемых деталей и разработка индивидуальных температурно-временных условий закалки изделий.

Для оценки эффективности предложенного решения оптимизации закалки и определения потенциального ресурса традиционных технологий непрерывной объемной закалки стали авторами статьи проведены исследования влияния температуры нагрева под закалку и длительности выдержки при этой температуре на механические свойства стали 30ХГСА.

Методика проведения исследований. Исследования проводили на трубных образцах из стали 30ХГСА внутренним диаметром 8 мм, толщиной стенки 1 мм, длиной 15 мм (рис. 1). Химический состав образцов, % мас.: 0,34 С; 0,95 Mn; 0,95 Cr; 1,1 Si.

Образцы подвергали следующим видам термической обработки (рис. 2): непрерывные закалки из соляной ванны, камерной печи в технической воде; непрерывные закалки с отпуском в камерной печи; изо-

Рис. 1. Исследуемый образец

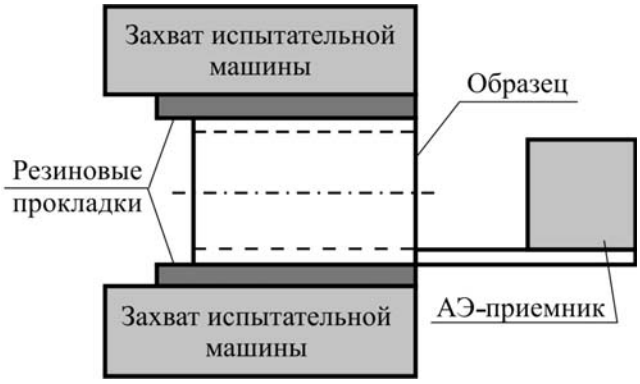


Рис. 3. Эскиз установки для испытания на сплющивание

термическая закалка из соляной ванны с выдержкой в щелочи.

Термически обработанные образцы испытывали на сплющивание с постоянной скоростью в соответствии с ГОСТ 8695–75 на испытательной машине INSTRON 3382K7046. По диаграммам нагружения (нагрузка–деформация) определяли следующие механические характеристики образца: нагрузку в момент образования трещины ($P_{тр}$), кН; нагрузку, соответствующую пределу текучести ($P_{0,2}$), кН; деформацию трубы (изменение внешнего диаметра) в момент появления трещины ($h_{тр}$), мм; изменение диаметра трубы при изменении нагрузки от $P_{0,2}$ до $P_{тр}$ ($h_{пл}$), мм.

Во время механических испытаний осуществляли запись сигналов акустической эмиссии (АЭ) [2]. Для акустического демпфирования образца между ним и захватами испытательной машины устанавливали резиновые прокладки толщиной 1,5 мм (рис. 3). Анализ АЭ-сигналов использовали для более точного (по сравнению с анализом механических диаграмм испытаний) определения момента появления первой трещины и для оценки вязкости разрушения (пластическая деформация стали сопровождается резким повышением активности АЭ-сигналов).

Кроме испытаний на сплющивание были проведены микроструктурный и электронно-фрактографический анализы и измерена твердость образцов по методу Роквелла.

Результаты исследований. Результаты исследований приведены в таблице и на рис. 4–7.

Из представленных данных видно, что незначительные изменения температуры закалки 890...930 °С и длительности нагрева под закалку 2...4 мин приводят к существенным изменениям механических ха-

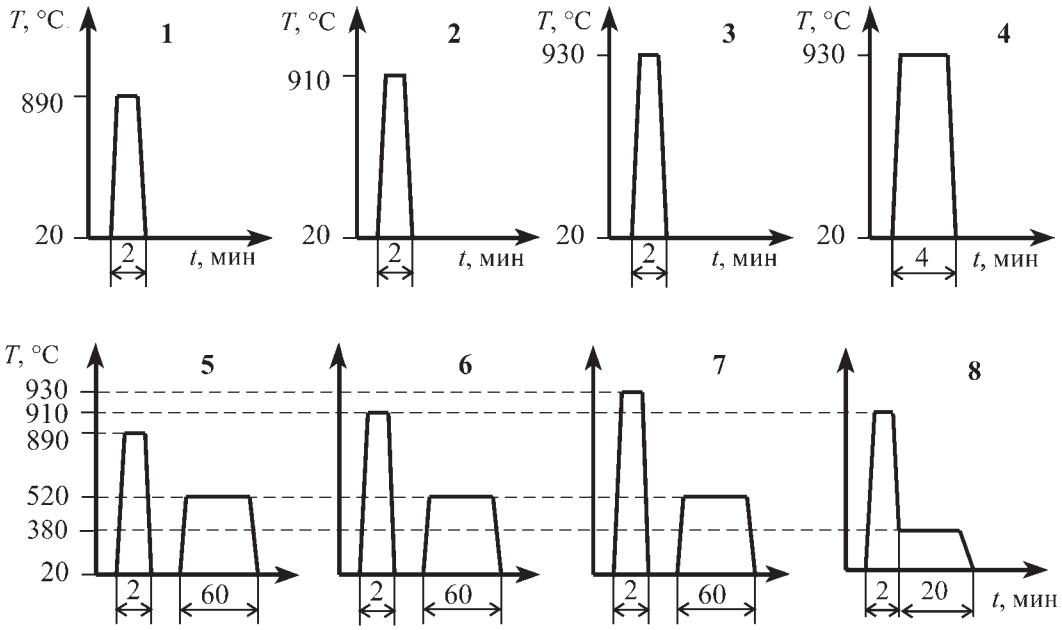


Рис. 2. Диаграммы термической обработки образцов из стали 30ХГСА:
1–3, 5–8 – нагрев под закалку в соляной ванне; 4 – нагрев в камерной печи; 5–7 – отпуск в камерной печи; 8 – изотермическая закалка с выдержкой в щелочи

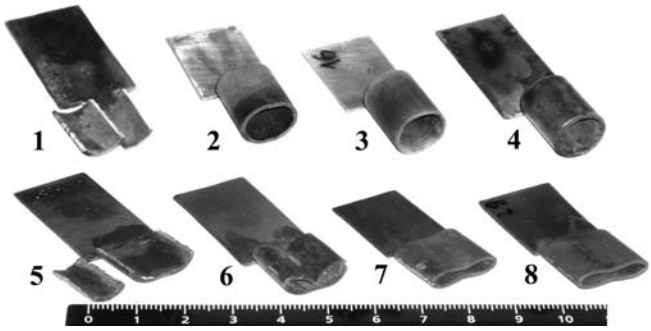


Рис. 4. Вид разрушения образцов из стали 30ХГСА при их испытании на сплющивание в зависимости от режимов термической обработки

рактеристик образцов. Так, закалка от температуры 890 °С обусловливает разрушение образца в области перехода от упругой деформации к пластической (см. рис. 5, ТО № 1), а закалка от более высоких температур, особенно от 930 °С, приводит к охрупчиванию материала и его разрушению в области упругой деформации. При этом чем выше температура и длительнее выдержка при нагреве под закалку, тем раньше появляются трещины. Твердость всех образцов составляет 54...56 HRC.

Однако последующий отпуск изменяет описанную закономерность – более высокая температура нагрева под закалку после отпуска приводит не только к повы-

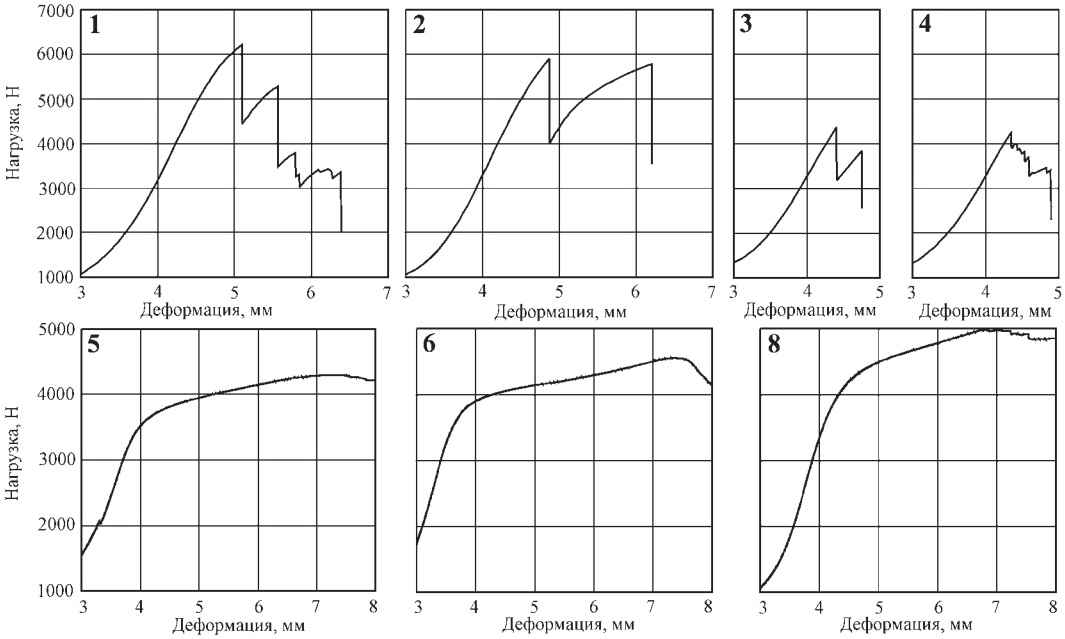


Рис. 5. Диаграммы механических испытаний на сплющивание трубных образцов из стали 30ХГСА после различных режимов термической обработки

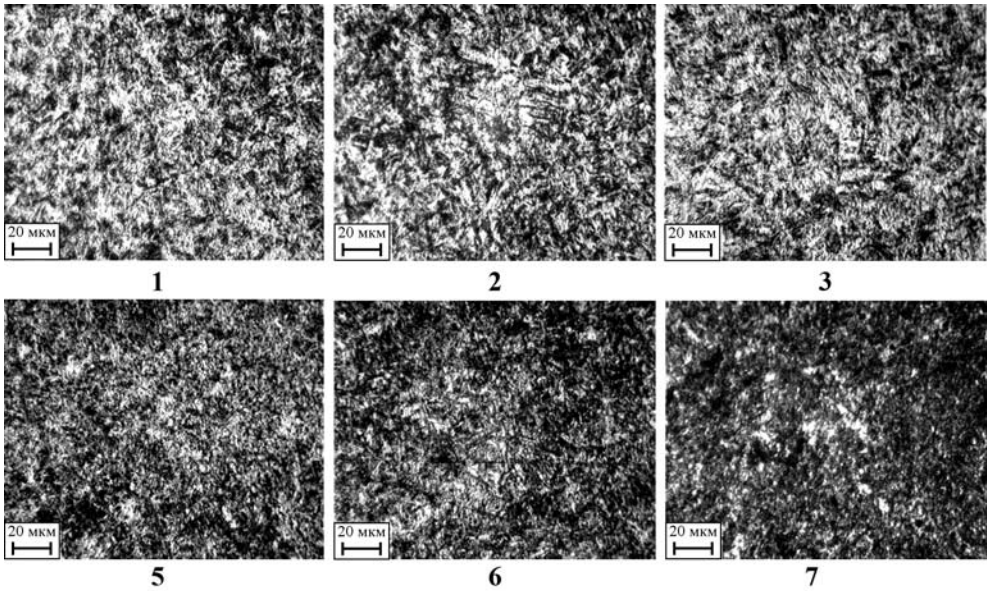


Рис. 6. Микроструктура образцов из стали 30ХГСА после различных режимов термической обработки

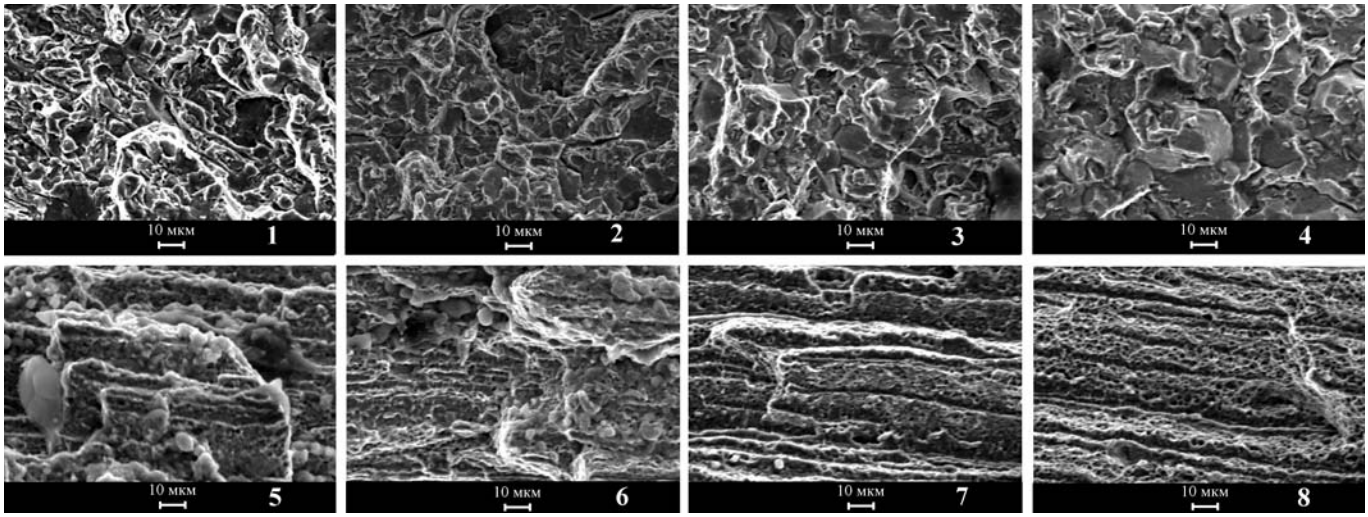


Рис. 7. Фрактограммы изломов трубных образцов из стали 30ХГСА после механических испытаний на сплющивание

шению прочности, но и к увеличению вязкости разрушения (см. рис. 5, ТО № 6), кроме того, на диаграмме механического испытания отчетливо наблюдаются не только стадии пластической деформации, но и участок деформационного упрочнения материала. В целом, отпуск приводит к снижению: твердости – более 35 %; $P_{0,2}$ – более 40 %; $P_{тр}$ – более 30 %; $\frac{P_{0,2}}{P_{тр}}$ – более 20 %. При этом $h_{пл}$ увеличивается от 0,2 до 3,5...3,7 мм.

Исследования микроструктуры (см. рис. 6) показали, что увеличение температуры нагрева под закалку вызывает небольшое увеличение размера зерен.

Фрактографические исследования (см. рис. 7) также показали, что повышение температуры и длительности выдержки при нагреве под закалку приводят к увеличению аустенитного зерна и мартенситных пластин. Фрактограммы выявляют следы вязкого разрушения только у образца, закаленного от 890 °С (см. рис. 7, ТО № 1) – количество фрагментов вязкого разрушения составляет 20 %. Отпуск образцов также изменяет указанную закономерность – максимальная вязкость разрушения наблюдается у образцов, закаленных от 910 °С (см. рис. 7, ТО № 6), у которых содержание хрупкой составляющей не превышает 10 %.

Таким образом, температурно-временные условия традиционной закалки стали 30ХГСА позволяют формировать нанодефектную структуру материала в широком диапазоне, вплоть до создания критической степени плотности дислокаций, приводящей к существенно высокой прочности и хрупкости. Нагрев под закалку с превышением температуры полиморфного

Влияние традиционных режимов термической обработки (ТО) стали 30ХГСА на характеристики образцов при их испытании на сплющивание

Номер режима ТО	$P_{тр}$	$P_{0,2}$	$\frac{P_{0,2}}{P_{тр}}$	$h_{тр}$	$h_{пл}$	HRC
	кН			мм		
Непрерывная закалка						
1	6,3	6	0,95	5,2	0,2	54
2	6	6	–	4,8	–	55
3	4,25	4,25	–	4,8	–	56
4	4,1	4,1	–	3,8	–	56
Непрерывная закалка с последующим отпуском						
5	4,3	3,4	0,79	7,5	3,5	37,5
6	4,5	3,5	0,77	7,8	3,6	37,5
7	4,51	3,8	0,84	7,5	3,75	37,5
Изотермическая закалка						
8	5,5	4,1	0,74	8,3	4,3	41

превращения как и увеличение длительности выдержки при аустенизации стали 30ХГСА более негативно сказывается на характеристиках стали (по сравнению с недостаточным нагревом и недостаточной выдержкой) и приводит к увеличению аустенитного зерна, мартенситных пластин, к формированию локальных зон с закритической степенью плотности дислокаций и в результате к высокой хрупкости.

Традиционный отпуск при температуре 520 °С в течение 1 ч приводит к значительному упорядочению структурной неоднородности закаленной стали 30ХГСА и к практически полному устранению созданной при закалке высокой степени плотности дислокаций. В результате происходит снижение прочности (на 35 %) и отношения $\frac{P_{0,2}}{P_{тр}}$ (на 20 %) со значительным увеличением пластичности от 0 до 47 %.

Применяемая в производстве технология изотермической закалки (см. рис. 2, ТО № 8) обеспечивает по сравнению с технологией термического улучшения наилучшие показатели прочности и пластичности (см. таблицу, рис. 5, ТО № 8), а также высокую степень вязкости разрушения (см. рис. 5, 7, ТО № 8). Однако эта технология также значительно снижает плотность дислокаций, что приводит к снижению прочности и предела пропорциональности изделий, т.е. не позволяет считать эту технологию оптимальным решением для термической обработки конструкционных сталей.

Заключение. Применяемые в настоящее время технологии закалки стали 30ХГСА в достаточно малой степени реализуют потенциальные возможности метода создания дефектных структур с помощью фазовых превращений мартенситного типа.

Режимы традиционной закалки среднелегированных углеродистых сталей типа 30ХГСА, обеспечивающее мартенситное превращение, значительно влияют на прочность и пластичность материала. Температурно-временные условия нагрева и выдержки, достаточные для полной аустенизации, в процессе закалки при мартенситном превращении создают условия для формирования высокой степени нанодефектной структуры, обеспечивающей максимальные значения пределов текучести и прочности при малой, но вполне выявляемой пластичности. Увеличение температуры выдержки и ее длительности приводит к росту аустенитного зерна и к неоднородности нанодефектной структуры при закалке, что способствует резкому уменьшению пластичности и прочности.

Традиционные способы упорядочения дефектной структуры среднелегированных сталей отпуском и изотермической закалкой приводят к чрезмерному упорядочению дислокационного распределения и к существенному увеличению пластичности, но с резким разупрочнением и снижением предела текучести до 50 %.

Определение оптимальных режимов закалки среднелегированных углеродистых сталей типа 30ХГСА, позволяющих сохранить высокую плотность дислокаций с оптимальным их распределением, является важным этапом на пути решения задачи изыскания методов активации процессов наноформирования мартенситной структуры, позволяющих одновременно повысить прочность, пластичность и предел текучести изделий, обеспечивая высокую надежность конструкций. Ключевой задачей на пути разработки методов формирования оптимальной нанодефектной структуры стали является точное определение температуры аустенизации и длительности выдержки, необходимой для его завершения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Зимин Н.В.** О влиянии температуры, скорости нагрева и исходного состояния структуры углеродистых сталей на процессы образования в них аустенита // Металлообработка. 2006. № 1.

2. **Семашко Н.А., Шпорт В.И., Муравьёв В.И.** Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002. 240 с.

Василий Илларионович Муравьёв, д-р техн. наук, ktsp@knastu.ru;
Владимир Алексеевич Ким, д-р техн. наук;
Алексей Валерьевич Фролов, канд. техн. наук;
Алексей Михайлович Мартынюк, аспирант;
Антон Вячеславович Кириков, аспирант

Читайте в следующем номере:

- **Жолдошов Б.М., Муратов В.С., Кенис М.С.** Особенности термоциклической обработки стали ШХ15
- **Жуков А.А., Новикова О.В.** К вопросу усталостного разрушения рабочих лопаток ГТД
- **Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Зубков Н.С., Гадалов В.Н., Сальников В.Г., Романенко Д.Н.** Влияние газолазерной резки на структуру и свойства машиностроительных сталей
- **Сысоев О.Е.** Исследование предельных состояний сплава ВТ20 с учетом параметров акустической эмиссии

УДК 621.762

В.А. Сурков, И.Ш. Абдуллин, Р.Ф. Шарафеев, В.Н. Иванова
(Казанский государственный технологический университет)

Механические свойства порошковых материалов из меди, обработанных плазмой высокочастотного индукционного разряда пониженного давления

Предложена обработка порошка меди плазмой высокочастотного индукционного разряда пониженного давления для повышения механических свойств материала.

Ключевые слова: плазма; порошковые материалы; процесс обработки; технология изготовления образцов.

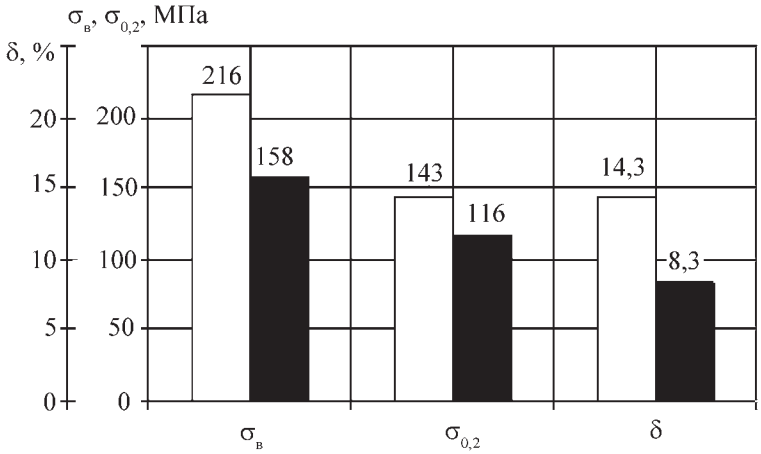
The processing of copper powder by plasma of the high-frequency induction category of the lowered pressure for increase of mechanical properties of material is offered.

Keywords: plasma; powder materials; processing process; specimen production technology.

Медные порошки широко применяют при изготовлении деталей машин и аппаратов для эксплуатации авиационной и ракетной техники, что заставляет ученых создавать новые медные порошки с определенными механическими и физико-химическими свойствами, изделия из которых сохраняют заданные эксплуатационные характеристики.

Одним из наиболее перспективных методов повышения механических свойств порошковых материалов меди является обработка порошковых материалов плазмой высокочастотного разряда пониженного давления, которая позволяет варьировать температуру обработки и характеристики ионного потока, поступающего из плазмы на поверхность обрабатываемого порошка.

Для повышения механических свойств медного порошка ПМС-1 (ГОСТ 4960–75) предложена электрофизическая обработка высокочастотной плазмой пониженного давления.



Результаты механических испытаний образцов из медного порошка ПМС-1:
□ – опытный образец; ■ – исходный образец

Обработку медного порошка ПМС-1 проводили в высокочастотной плазменной установке, состоящей из кварцевой цилиндрической разрядной камеры с внутренним диаметром 10...110 мм и трехкольцевого медного водоохлаждаемого индуктора. Рабочее давление 1,33...133 Па, частота генератора 1,76 МГц, потребляемая мощность 2...18 кВт.

Плазменную обработку осуществляли введением в плазменную струю порошка меди в соответствии со следующими технологическими параметрами: давление в камере p = 40 Па; расход газа G = 0,08 г/с; ток анода I = 1,5 А; напряжение на аноде U = 7,8 кВ; плазмообразующий газ – аргон + воздух (50:50).

Образцы для исследования механических свойств материала изготовляли по следующей технологии:

1. Просеивание через сетку 0,2 мм.
2. Добавление в шихту в качестве пластификатора стеарата цинка в количестве 1 % от массы материала.
3. Прессование образцов при 400 кН.
4. Спекание образцов в шахтной печи в среде диссоциированного аммиака по режиму: загрузка при температуре 20 °С; нагрев печи до 600 °С, выдержка 90 мин; нагрев печи до 660 °С, выдержка 90 мин; охлаждение на воздухе в среде диссоциированного аммиака.

Механические свойства образцов определяли в исходном состоянии при температуре 20 °С на разрывной машине.

Взаимодействие высокочастотной плазмы пониженного давления в диапазоне 1,33... 133 Па, частица медного порошка является дополнительным электродом. В результате у ее поверхности, как и в приэлектродной области высокочастотного индукционного разряда, образуется *слой положительного заряда* (СПЗ) толщиной ~10^{-3} м [2]. Проходя сквозь слой СПЗ и ускоряясь в его электрическом поле, положитель-

ные ионы плазмы получают дополнительную энергию до 100 эВ [1, 3].

При столкновении с поверхностью частиц медного порошка ионы передают приобретенную кинетическую энергию и потенциальную энергию рекомбинации поверхностным атомам медного порошка и частично внедряются в его поверхностный слой. Если плазмообразующий газ содержит атомы азота, кислорода или углерода, то в результате диффузионного насыщения поверхностного слоя медного порошка этими элементами повышаются механические и физико-химические свойства обрабатываемого металла.

На рисунке приведены результаты механических испытаний образцов, которые показывают увеличение показателей механических свойств опытного образца.

Таким образом, плазменная обработка положительно влияет на прессование и спекание медных порошков, что приводит к увеличению показателей механических свойств материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С.** Применение ВЧ-плазмы пониженного давления для газонасыщения поверхности металлов // Вестник Казанского технол. ун-та. 2003. № 1. С. 172–179.

2. **Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кудинов В.В.** Физическая модель взаимодействия высокочастотной плазмы с твердыми телами в динамическом вакууме // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 4. С. 45–51.

3. **Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кудинов В.В.** Математическая модель высокочастотной плазменной обработки материалов в динамическом вакууме // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 6. С. 21–27.

Вячеслав Анатольевич Сурков, канд. техн. наук,
Surkov-v@inbox.ru;
Ильдар Шаукатович Абдуллин, д-р техн. наук;
Рустем Фаридович Шарафеев, канд. техн. наук;
Вера Николаевна Иванова, канд. хим. наук

Поздравляем!

Фёдора Павловича Михаленко

с 90-летием

23 февраля 2012 г. исполнилось 90 лет профессору, д-ру техн. наук, заслуженному деятелю науки РФ, почетному работнику высшего профессионального образования РФ Фёдору Павловичу Михаленко.

В 1941 г. Фёдор Павлович окончил Почепскую среднюю школу (Орловская область) с отличием, после чего был призван в ряды Красной Армии. Вскоре был ранен, демобилизован по состоянию здоровья и до 1943 г., по направлению Саратовского облвоенкомата, работал трактористом-комбайнером в одном из совхозов Саратовской области. В 1948 г. Ф.П. Михаленко закончил Московский институт стали и сплавов по специальности "Пластическая и термическая обработка металлов", затем работал на Подольском механическом заводе инженером-технологом в штамповочном цехе. После окончания аспирантуры при МИСиСе в 1954 г. был направлен на работу в Горьковский политехнический институт, с которым и связал всю свою дальнейшую жизнь. В институте Фёдор Павлович прошел путь от старшего преподавателя до профессора. В разные годы Ф.П. Михаленко исполнял обязанности заместителя заведующего кафедрой, заместителя декана ряда факультетов, заместителя председателя Волго-Вятского Совета по координации и планированию научно-исследовательских работ по техническим и естественным наукам. За активную работу Фёдор Павлович неоднократно поощрялся городскими и областными органами, Министерством образования страны.

Ф.П. Михаленко активно участвует в педагогической и научной деятельности. Он является автором и соавтором более 200 печатных работ, в том числе 30 изобретений и 5 монографий, вышедших в издательстве "Машиностроение".

Несмотря на столь почтенный возраст, Ф.П. Михаленко продолжает работать профессором кафедры "Машиностроительные технологические комплексы. Обработка давлением и сварочное производство" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Фёдор Павлович выполняет все виды учебной нагрузки, блестящий лектор, он пользуется большим уважением у студентов и сотрудников университета.

Коллектив редакции, редакционный совет журнала
"Заготовительные производства в машиностроении",
ректорат университета и сотрудники кафедры сердечно поздравляют
Фёдора Павловича с замечательной датой в его жизни!
Желают ему крепкого здоровья и дальнейших успехов в научной деятельности!

УДК 681.3.06

А.В. Филина, И.М. Грядунов *(Орловский государственный технический университет)*

Система оптического контроля качества технической продукции крупносерийного и массового производства на примере разработки автомата контроля заготовок, отрезаемых от прутка пластическим сдвигом

Рассмотрен вариант построения бесконтактной системы контроля качества технической продукции крупносерийного и массового производства на примере разработки и описания принципа действия автомата контроля качества заготовок, получаемых отрезкой пластическим сдвигом от пруткового материала.

Ключевые слова: контроль качества; прутковый материал; LabVIEW; машинное зрение; автоматизированная система; отрезка.

The variant of construction of the contactless monitoring system of quality of technical production business lot and mass production on example of working out and the description of action principle of the quality assurance automatic machine of the preparations received by cutoff by plastic shift from rod material is considered.

Keywords: quality assurance; rod material; LabVIEW; machine vision; automated system; cutting.

В области разделительных операций, в частности, отрезки пластическим сдвигом важен контроль качества получаемых заготовок. Применение подобной системы контроля особенно актуально в серийном и массовом производстве, если к получаемым заготовкам предъявляют высокие требования по форме, размерам и механическим свойствам.

Геометрические параметры полученных заготовок в основном контролируют по следующим параметрам (рис. 1):

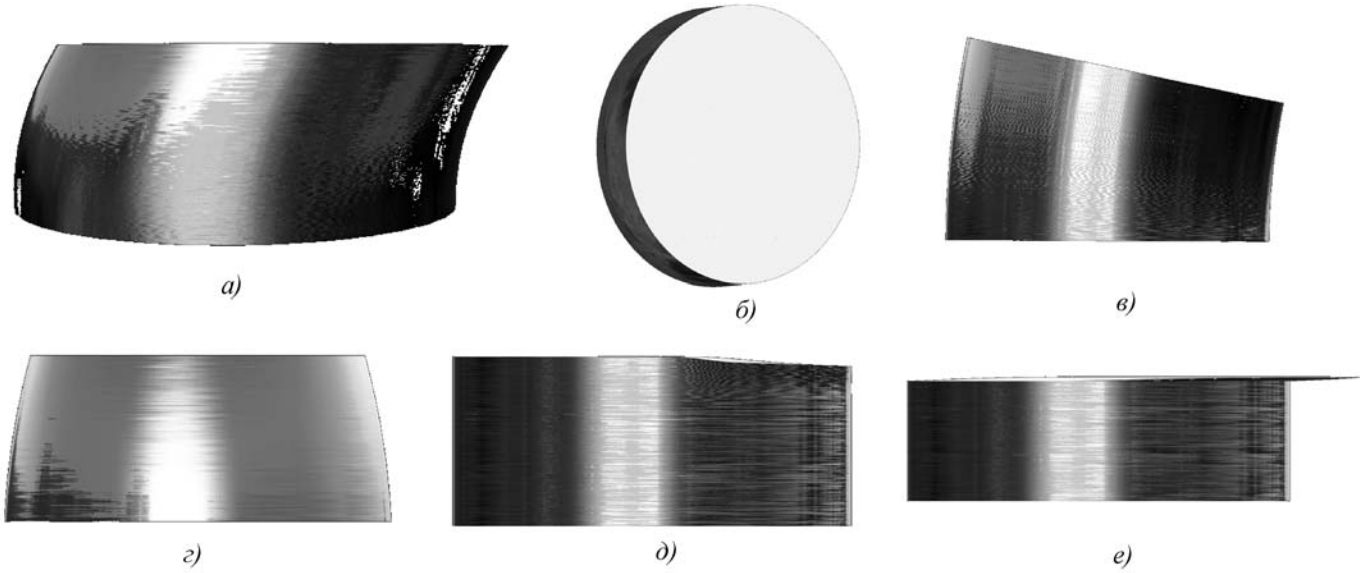


Рис. 1. Дефекты заготовок, получаемых отрезкой пластическим сдвигом:
а–е – дефекты 1–6 соответственно

1. Отклонение от перпендикулярности торцов и боковых поверхностей.

2. Овальность торцов заготовки или всей заготовки (в случае отрезки коротких заготовок).

3. Непараллельность торцов.

4. Конусность.

5. Вырыв (скол).

6. Смазывание торца заготовки.

Учитывая значительное влияние приведенных выше параметров на качество конечного изделия (если получаемые заготовки являются полуфабрикатами), задача разработки автоматов контроля – весьма актуальна.

Для разработки программного обеспечения для реализации системы контроля качества заготовок, отрезаемых от пруткового материала, выбрана программная среда LabVIEW.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workshop) – это система программирования, разработанная фирмой National Instruments (США) и ориентированная на создание приложений в области автоматизации научных исследований, управления производством, промышленными установками. По своим возможностям она не уступает таким системам программирования общего назначения, как Delphi или C++.

Система LabVIEW основана на принципах графического программирования и является проблемно-ориентированной. Она поддерживает программирование множества действий и реализует концепцию виртуальных приборов. Среда программирования LabVIEW является удобным программно-аппаратным комплексом для разработки приложений, позволяющих осуществлять опрос датчиков, установленных на объекте исследования, обработку полученной информации, генерацию сигналов для его управления.

При обработке сигналов и их преобразовании из аналоговых в цифровые и наоборот могут быть использованы платы ЦАП/АЦП.

Таким образом, можно сделать вывод, что система LabVIEW идеально подходит для разработки программного обеспечения для промышленных систем контроля.

Алгоритм работы разрабатываемой установки следующий:

1. Система увеличивает счетчик числа отрезанных заготовок на 1.

2. Осуществляется проверка полученного числа отрезанных заготовок со статистическим значением максимально допустимого числа заготовок, которое можно обработать на данном инструменте.

3. Если число отрезанных заготовок меньше или равно максимально допустимому, то осуществляется процесс отрезки, при этом выполняется контроль силовых и скоростных параметров процесса отрезки. В противном случае система выдает предупреждение о необходимости замены режущего инструмента и линия останавливается.

4. Подача отрезанной заготовки на непрерывно движущийся конвейер и перенос ее к автомату контроля параметров качества заготовок.

5. Выполнение комплексного анализа отрезанной заготовки. В данном случае под комплексным анализом понимается оценка качества заготовки по перечисленным выше параметрам.

6. После оценки качества заготовки выносится решение о степени ее пригодности для дальнейшей обработки в качестве полуфабриката или использовании как готовое изделие.

По завершении данного алгоритма программа возвращается к п. 1 и работа повторяется в цикле.

Изменение счетчика отрезанных деталей и сравнение его с установленным значением осуществляется для контроля состояния режущего инструмента и при необходимости – его замены. Программное управление процессом отрезки и контроль скоростно-силовых параметров операции позволят автоматизировать работу оборудования и выполнять контроль его состояния.

Контроль перечисленных параметров необходим для предотвращения попадания бракованных заготовок на дальнейшую обработку или в партии готовой продукции.

Графическое представление данного алгоритма приведено на рис. 2.

В автомате контроля качества заготовок используются бесконтактные методы измерений, а именно оптические, основанные на анализе изображений.

Для построения подобной системы контроля качества заготовок необходимо следующее программное обеспечение и оборудование:

- NI Vision Development Module;
- NI LabVIEW;
- персональный компьютер с установленной ОС Windows;
- комплект оборудования для захвата изображения (камеры и плата для ввода изображения в компьютер);
- твердомер и микрометр для проведения бесконтактных измерений шероховатости поверхности;
- комплект тензометрических датчиков для установки на твердомер.

Схема системы контроля качества параметров заготовок, отрезаемых от прутка, приведена на рис. 3.

Согласно [1] на обработку одного изображения затрачивается 222,2 мс времени (испытания проведены фирмой National Instruments на оборудовании PIII 500 MHz, 256 MB RAM, LabVIEW 5.1, IMAQ Vision 5.0, Image size 640×480 px с учетом произвольной ориентации объекта анализа), т.е. не сложно рассчитать пропускную способность основной ветви автомата контроля. Учитывая, что для выполнения анализа заготовки необходимо два изображения, то пропускная способность составит две заготовки в секунду.

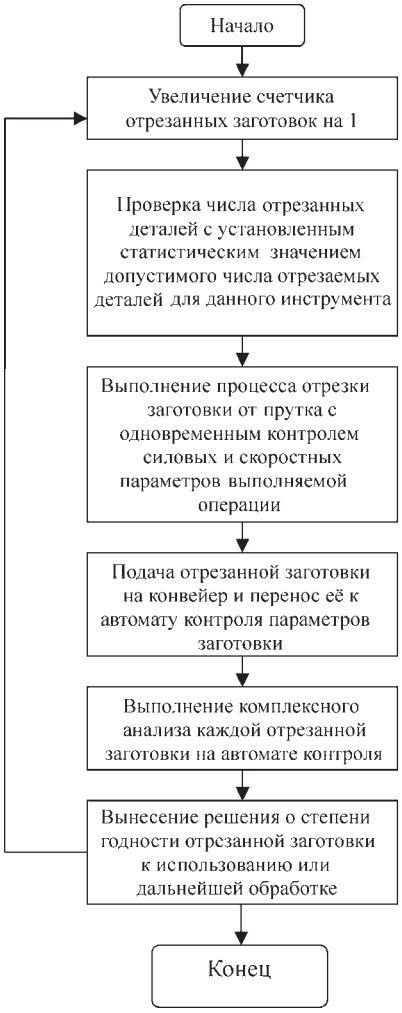


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы системы контроля

Согласно [2] точность выполняемых измерений достигает ±4,5 мкм (данные приведены для камеры PULNiX TM-260NIR). Скорость захвата монохромного изображения 60 кадров/с (монохромная плата захвата NI-1409). Приведенные характеристики аппаратной части автомата контроля качества отрезаемых заготовок полностью удовлетворяют условиям крупносерийного и массового производства. Также в целях обеспечения надежности работы системы рекомендуется применение промышленного компьютера PXI серии производства National Instruments.

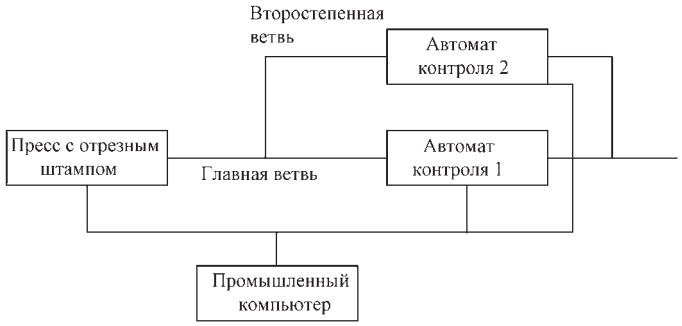


Рис. 3. Схема устройства системы контроля качества заготовок, отрезаемых от прутка

Построение подобных автоматов контроля технических изделий актуально и для других отраслей производства, таких как стекольная промышленность, где предъявляют повышенные требования к форме и внутренней структуре каждого изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **http://www.ni.com.**

2. **Обработка** и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, В.А. Князь, А.Н. Ходарев, А.В. Моржин. М.: ДМК Пресс, 2007. 464 с.

Анна Владимировна Филина, канд. техн. наук,
anvlf@mail.ru;
Игорь Михайлович Грядунов, студент

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 14.12.2011 г. Подписано в печать 27.01.2012 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,63. Заказ 46. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.