

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ  
ЖУРНАЛ

# ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 3 март 2010

Председатель  
редакционного совета и  
Главный редактор  
СЕМЁНОВ Е.И.

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

Зам. Главного  
редактора:  
КЛЕЙЗЕР П.Е.  
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.  
ЖЕСТКОВА И.Н.  
ЗАРУБИН А.М.  
КАПУСТИН А.И.  
КАСАТКИН Н.И.  
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.  
ЯКОВЛЕВ С.С.  
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственные  
за подготовку и выпуск  
номера:  
ДЮБКОВА Н.В.  
СЕРИКОВА Е.А.  
МАКАРЕНКО Е.Д.  
СУРОВ И.Е.

За содержание рекламных  
материалов ответственность  
несет рекламирующий

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 "Югра России"  
60261) или непосредственно  
из издательства.

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



## СОДЕРЖАНИЕ

Дёмин В.А. Московскому государственному индустриальному университету (МГИУ) 50 лет . . . . . 3

### Литейное и сварочное производство

Кисиленко Л.Е., Бычков Б.В., Фуфаев В.Э. Совершенствование технологии литья поршней с упрочняющей вставкой . . . . .	4
Шуляк В.С., Бычков Б.В., Опыхтин П.Н. Сополимер CL600 для производства отливок литьем по газифицируемым моделям . . . . .	9
Антонов А.А., Стеклов О.И., Антонов (мл.) А.А., Сидорин Ю.В. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов . . . . .	13
Ластовирия В.Н. Экспериментальная методика идентификации уравнения связи для оценки формы проплава в ходе электронно-лучевой сварки . . . . .	19

### Кузнечно-штамповочное производство

Дёмин В.А., Матюшкин Д.М., Ростовцев Д.В., Семёнов Е.И. Экономичный процесс изготовления деталей типа шайба . . . . .	25
Аверьянова И.О. Технологии изготовления штампов и пресс-форм с использованием электроэроздионного оборудования . . . . .	27
Власов А.В., Субич В.Н., Шестаков Н.А. Моделирование механических свойств пористых и композитных материалов . . . . .	31

### Прокатно-воловильное производство

Боровик А.А. Новая система электропривода для стана холодной прокатки труб . . . . .	36
--------------------------------------------------------------------------------------	----

### Материаловедение и новые материалы

Кошкин В.И., Кравченков А.Н., Руденко И.Б., Шляпин А.Д. Применение эффекта адиабатического сдвига для поверхностного легирования конструкционных материалов . . . . .	40
Овчинников В.В. Влияние режима термической обработки на структуру и свойства листов сплава АВ . . . . .	43

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.

# **BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING**

(Forging and stamping, foundry and others productions)

**Nº 3 March 2010**

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

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

Editorial Assistants: KLEYZER P.E. 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. ZHESTKOVA I.N. ZARUBIN A.M. KAPUSTIN A.I. KASATKIN N.I. 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. YAKOVLEV S.S. YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialists: DYUBKOVA N.V. SERIKOVA E.A. MAKARENKO E.D. SUROV I.E.

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **81580**, on the united catalogue "Pressa Rossi" **39205**, catalogue "Pochta Rossi" **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,  
zpm@rambler.ru



## **CONTENTS**

Demin V.A. Moscow State Industrial University 50 years . . . . . 3

### **Casting and Welding Productions**

Kisilenko L.E., Bychkov B.V., Fufaev V.E. Perfection of pistons with hardening insert foundry technology . . . . .	4
Shulyak V.S., Bychkov B.V., Opykhtin P.N. Copolymer CL600 for production of casts by moulding on gasifiable sample pieces . . . . .	9
Antonov A.A., Steklov O.I., Antonov A.A. (Jr), Sidorin Yu.V. Research of technological residual pressures in welded joints of the main pipe-lines . . . . .	13
Lastovirya V.N. Experimental method for equation of connection identification for fusion zone form estimation in electron-beam welding process . . . . .	19

### **Forging and Stamping Productions**

Demin V.A., Matyushkin D.M., Rostovtsev D.V., Semenov E.I. Economical process of washer producing . . . . .	25
Averyanova I.O. Technologies of stamps and moulds fabrication using electroerosion equipment . . . . .	27
Vlasov A.V., Subich V.N., Shestakov N.A. Modelling of mechanical properties of porous and composit materials . . . . .	31

### **Rolling and Drawing Productions**

Borovik A.A. New system of electric drive for cold pipe rolling mill . . . . . 36

### **Physical Metallurgy and New Materials**

Koshkin V.I., Kravchenkov A.N., Rudenko I.B., Shlyapin A.D. Application of adiabatic shear phenomenon for surface alloying of structural materials . . . . .	40
Ovchinnikov V.V. Influence of regime of heat treatment on structure and properties of the sheets of alloy AB . . . . .	43

***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"***

В.А. Дёмин (Московский государственный индустриальный университет)

# **Московскому государственному индустриальному университету (МГИУ) 50 лет**

Â óí èââðñèðâðå í ðî áî äýðñý í áó-í û á èññðéâââââí áâáí èý í í áâðââæâí èý , nî í ôââðñòâðóþ ù èí í ðî ô èéþ âóçâ è í ðèí ðèðâðóí û í áââðâæâí èý í ðàçâèðèý í àóêè è òâðóí èéè, óðââðæâââí í û í ðàâðâðéüñòâí í ðî ññèè. Ðàââí òâðòâðó ðå äèññâððâðòëí í û õ nî åâðâðå í çâú èðââäí êðò ðññèò è èâí äèââðñèðó äèññâððâðòëé.

Í ðí ó áññí ðññí -íð áðí í ááâáðáëüññééé níñ ñòáá è ø ðàò níñ ððóáí ééñ á í ÁÉÓ í áññ-éðóù ááâáò í éí éí 1000 ÷áéí ááéé. Ááæááé áí í ècäáþ ðñý í í í í ððáð èé, náí ðí ééé ððóáí á, ó-áááí ééé è ó-áááí ûá í í níñ áéý.

1. Èññéâáí ááíé éá í áðáíé èéé ááð í ðí èðí ááíé èý è ñooðéooðí í áðáçí ááíé èý í ðé í áðááí òéá áðáæéöèí í íúð è íí- ðí ø éí áúð í áðáæéè-áññéð í áðáæéàéí á.

2. Đákđááí òèà ñí áödeàëüí í ãí 1 áí ðóáí áàí èý äëý í àí 1 ñòðóéòòðèðí áàí èý í àòàðèàëí á êí í áéí èðí ááí í úí í á-  
äòóåí áàí

3. ĐÀC ĐÃNG AÍ ÒÈA ÒÀI ÒÀÒÈ ÒÀÑÈÈÔ Ì ÑÍ Ì Á ÄÈÍ ÀÌ È ÷ÀÑÈÈÔ È ÈÌ Ì ÓÖÜÑÍ ÙÔ Ì ÒÀÑÑÍ Á È Ì ÀØ ÈÍ ÄÈÝ ÈÇÃ ÒÌ ÁÆÅÍ ÈÝ ÒÀ-

5. Daçðaañl ðea e i ñoel eçäoeý ðaoi ñ i ðeñ haadœe e ñ aal eaaeñ ñ i ðeñ al aal eal NAI E  
 6. Daçðaañl ðea e i ñoel eçäoeý ðaoi ñ i ðeñ haadœe e ñ aal eaaeñ ñ i ðeñ al aal eal NAI E  
 7. Daçðaañl ðea e i ñoel eçäoeý ðaoi ñ i ðeñ haadœe e ñ aal eaaeñ ñ i ðeñ al aal eal NAI E

7. Ni çaaí eá i aðni aeoæai uo eí i i i çeoel i i uo i aððæaei a n eni i euçí aai eá i aððæaeoel i i uo oaoi i ei æe i a áacå i áo-í i -i aððací áaðæeüí i á òáí òða, ní çääí i i á i ððø aí èp i eí i aððací áaí èy ðô.

Âù i í éí yþþóny ðæðæa è i í í aða áðoðæa ðaaí ou, i hí aaí i í aéý i ðaaí ðeyðoeé a l hæau.  
Â í àñõti ýu áá aðai ý aâit aëðoný a ñòði é i í aâu é eit ðri ón ór eââðñèðâðà i eði ù aâüþ 8 ðuñ. i ².

*Виктор Алексеевич Дёмин, д-р техн. наук, профессор*

*Виктор Алексеевич Демин, кандидат физико-математических наук, профессор*



# ЛИТЕЙНОЕ И СВАРОЧНОЕ

## ПРОИЗВОДСТВА



УДК 621.747:621.436:669.01

Л.Е. Кисиленко, Б.В. Бычков, В.Э. Фуфаев  
(Московский государственный индустриальный университет)

### Совершенствование технологии литья поршней с упрочняющей вставкой

Проанализировано влияние тепловых условий формирования отливки на образование дефектов в отливках дизельных поршней из алюминиевых сплавов в области упрочняющей вставки из нирезистостого чугуна. Процесс оптимизирован за счет изменения допустимого интервала колебания факторов с использованием метода планирования полного факторного эксперимента.

*Influence of thermal conditions of cast formation on formation of defects in casts of diesel pistons from aluminium alloys in the field of hardening insert from Ni-resist cast iron is analysed. Process at the expense of change of admissible interval of factors fluctuation with use of planning method of full factorial experiment is optimised.*

**Ключевые слова:** тепловые условия; алюминиевые сплавы; нирезистовый чугун; поршень.

**Keywords:** thermal conditions; aluminium alloys; Ni-resist cast iron; piston.

Известно, что основной причиной понижения служебных (прежде всего механических) свойств отливок является газоусадочная пористость и неметаллические включения, которые сосредотачиваются в местах отливки, затвердевающих последними, т.е. в термических узлах. В оптимальном варианте они должны быть выведены в прибыль или в неответственную часть отливки.

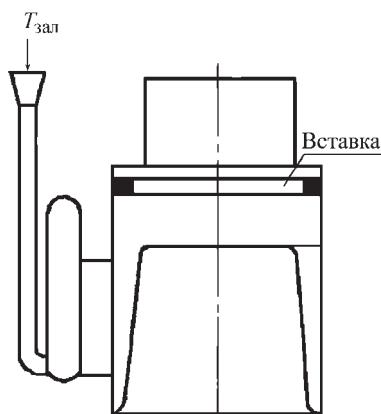


Рис. 1. Схема поршня

На ряде заводов (КАМАЗ, "Мотордеталь" (Кострома), МЗАЛ и др.) отливки дизельных поршней с упрочняющей вставкой под верхнее компрессионное кольцо получали из широкointервальных заэвтектических сплавов АК18 и АК15МН (на МЗАЛе) литьем в кокиль (рис. 1). Уровень брака на МЗАЛе и КАМАЗе доходил до 30 %, что приводило к большим потерям в связи с трудностями утилизации отходов: при переплавке брака вставка из нирезистового чугуна повторно не используется для получения отливки и загрязняет расплав. Основными причинами брака были газоусадочные раковины и спай в области вставки.

Технология получения отливок поршней предусматривает алитирование вставки погружением ее в расплав в течение 3...5 мин. Вставки предварительно обезжиривают и проводят дробеметную обработку. В качестве алитирующего сплава используются сплавы АК7 (КАМАЗ), АК9 (АЛ4) (МЗАЛ) и АК12ММгН (АЛ30) ("Мотордеталь"). Алитированная вставка переносится в кокиль и заливается основным сплавом.

Газоусадочные дефекты связаны с неправильной организацией направленного затвердевания в области вставки. Если температура вставки в момент контакта

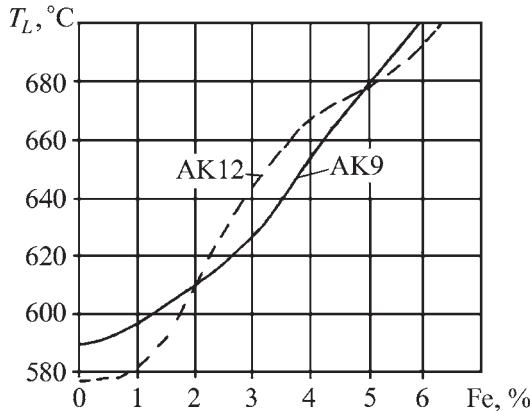


Рис. 2. Изменение температуры ликвидуса в сплаве Al-Si с 9 % Si (сплав AK9ч) и с 11,7 % Si (сплав AK12)

с расплавом выше, чем температура расплава (режим "горячей" вставки), то в области вставки образуется тепловой узел и возникают газоусадочные дефекты. Если температура вставки ниже температуры расплава при контакте со вставкой (режим "холодной" вставки), то фронт кристаллизации отодвинет газоусадочные дефекты во внутреннюю, прибыльную часть отливки и дефектов в области вставки не будет. Однако понижение температуры вставки ниже температуры ликвидуса алитирующего сплава приводит к тому, что оксидная пленка на поверхности алитированной вставки, которая легко смывается потоком основного расплава, если алитирующий сплав под пленкой (подложка) остается жидким, не будет удаляться потоком расплава, что приведет к дефектам в виде спаев.

Проблема усугубляется тем, что температура ликвидуса алитирующего сплава (рис. 2) быстро растет с увеличением содержания железа в нем, сплав неизбежно насыщается железом от алитируемых вставок и арматуры. Это ограничивает понижение температуры алитирующего сплава. Оптимальным остается узкий диапазон температур заливки основного сплава и сплава алитирования, обеспечивающий получение отливок без дефектов в области упрочняющей вставки. Чтобы оценить его, нужно провести анализ тепловых условий формирования отливки дизельного поршня с упрочняющей вставкой.

Исходное уравнение теплопроводности Фурье:

$$\frac{dT}{dt} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где  $T$  – температура, °C;  $t$  – время, с;  $a = \lambda / (c\rho)$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{C}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Дж}/(\text{с}\cdot\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho$  – плотность  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $x, y, z$  – координаты.

Для кокильного процесса характерна модель малой интенсивности охлаждения отливки в форме.

Критерий  $B_1 = \beta x / \lambda \ll 1$ , где  $\beta = \lambda_{kp} / x_{kp}$  – коэффициент теплоотдачи в слой кокильной краски,  $\text{Дж}/(\text{с}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $x, x_{kp}$  – приведенные размеры соответственно отливки и краски, м;  $\lambda_{kp}, \lambda$  – коэффициенты теплопроводности соответственно слоя краски и отливки.

Модель малой интенсивности означает, что перепадом температуры по сечению отливки и кокиля можно пренебречь по сравнению с перепадом температуры в слое кокильной краски, который принимается линейным. На рис. 3 показано тепловое взаимодействие отливки и кокиля, а на рис. 4 перепад температур на границе кокиль–отливка. Принятые допущения дают возможность существенно упростить задачу.

Вместо уравнения (1) в качестве исходного используем уравнение для одномерной нестационарной задачи:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Интегрирование уравнения (2) при условии, что  $T$  зависит от времени, но не зависит от координаты (модель малой интенсивности охлаждения) после упрощений приводит к линейному уравнению:

$$t = \frac{c\rho x_1 (T_{\text{нач}} - T)}{\beta_{kp} (T_{\text{нач}} - T_{\Phi})}, \quad (3)$$

где  $x_1 = V/F$  – приведенный размер элементов литниковой системы или отливки;  $V$  – объем,  $\text{м}^3$ ;  $F$  – площадь поверхности охлаждения,  $\text{м}^2$ ;  $T_{\text{нач}}$ ,  $T$ ,  $T_{\Phi}$  – температуры соответственно начальная, в момент времени  $t$ , формы.

Именно формула (3) используется для оценки охлаждения расплава от раздаточной печи до контакта со вставкой и вставки от печи алитирования до контакта с расплавом.

В качестве параметра, от которого зависит образование дефектов, целесообразно выбрать величину

$$\Delta T_1 = y_1 = T_p - T_{\text{вс}}, \quad (4)$$

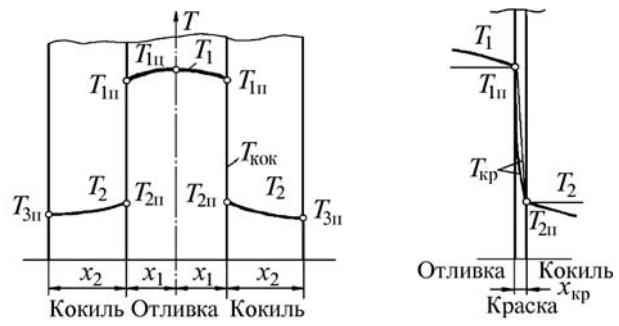


Рис. 3. Тепловое взаимодействие отливки и кокиля (поперечное сечение):

$T_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{ц}}$ ,  $T_{\text{кок}}$  – температуры соответственно поверхности, центра и кокиля

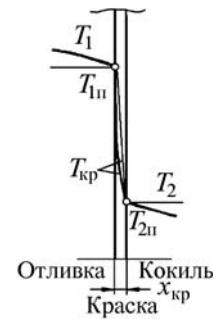


Рис. 4. Перепад температур на границе кокиль–отливка

где  $T_p$  – температура расплава в момент контакта расплава со вставкой, а  $T_{vc}$  – температура вставки в тот же момент.

Эта разность определяет направление движения фронта кристаллизации. Если  $\Delta T_1 > 0$  (режим "холодной" вставки) газоусадочных дефектов в области вставки не будет и, наоборот, если  $\Delta T_1 < 0$  (режим "горячей" вставки) могут быть газоусадочные дефекты в области вставки.

В качестве второго параметра, от которого зависит образование дефектов, целесообразно выбрать величину

$$\Delta T_2 = y_2 = T_{vc} - T_L, \quad (5)$$

где  $T_L$  – температура ликвидуса алитирующего сплава, зависящая от содержания Fe.

Если подложка, на которой находится образовавшийся при переносе вставки и ожидании контакта оксидный слой, будет жидкой, он легко смоется потоком основного металла. Это соответствует  $\Delta T_2 > 0$ . При  $\Delta T_2 < 0$  подложка затвердевает и несмытая оксидная пленка может быть причиной спая, затрудняющего теплопередачу от поршня к гильзе и уменьшающего прочность связи вставки с поршнем. Таким образом, параметры  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  противоречивы и оставляют узкий диапазон температур для оптимальных режимов.

Подставляя средние значения параметров технологического процесса в формулу (3), получаем результаты, приведенные на рис. 5. Точка A соответствует средняя температура заливки расплава в ковш, равная 800 °C. Среднее время охлаждения расплава в ковше определяли хронометрированием, оно составило 15 с. Температура заливки расплава в кокиль равна по расчету 784,4 °C. При движении расплава по элементам литниковой системы до контакта со вставкой темпера-

тура уменьшается до 719,2 °C (расчетное значение). Рабочий, проставляющий вставку, вынимает ее из печи алитирования на 3,5 с позднее, чем другой рабочий, зачерпывающий расплав (хронометраж). В среднем через 9,5 с он проставляет вставку в кокиль, а через 9,26 с происходит контакт вставки с расплавом. На первом этапе EF вставка охлаждается от 760 до 707,1 °C. На втором этапе FK скорость охлаждения вставки уменьшается, так как уменьшается коэффициент теплоотдачи от вставки к окружающей среде из-за высокой температуры кокиля. Оценка по формуле (3) дает значение 668,8 °C. Режим холодной вставки обеспечивается перепадом температур  $y_1 = \Delta T_1 = 50,4$  °C, а наличие жидкого расплава на подложке величиной  $y_2 = \Delta T_2 = 12$  °C даже при увеличении содержания железа в алитирующем сплаве до 4 %.

Таким образом, расчетом показано, что для средних значений технологических параметров (факторов) критерии качества  $y_1$  и  $y_2$  выполняются и брака отливок быть не должно. Было сделано предположение, что брак отливок зависит от допускаемого заводской технологией интервала изменения параметров (факторов), влияющих на тепловые условия, при их неблагоприятном сочетании. Для проверки было предложено использовать таблицы (матрицы), применяемые в теории полного факторного эксперимента, реализующего все возможные сочетания факторов.

В качестве параметров оптимизации использовали критерии качества (функции отклика)  $y_1$  и  $y_2$ . Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Расчеты проводили с использованием формулы (3).

Табл. 1 состоит из двух частей. В первой части приведены факторы, влияющие на функцию отклика  $y_1$ , во второй части – на  $y_2$ . Множество факторов, приведенное в первом левом столбце, соответствует тепловым

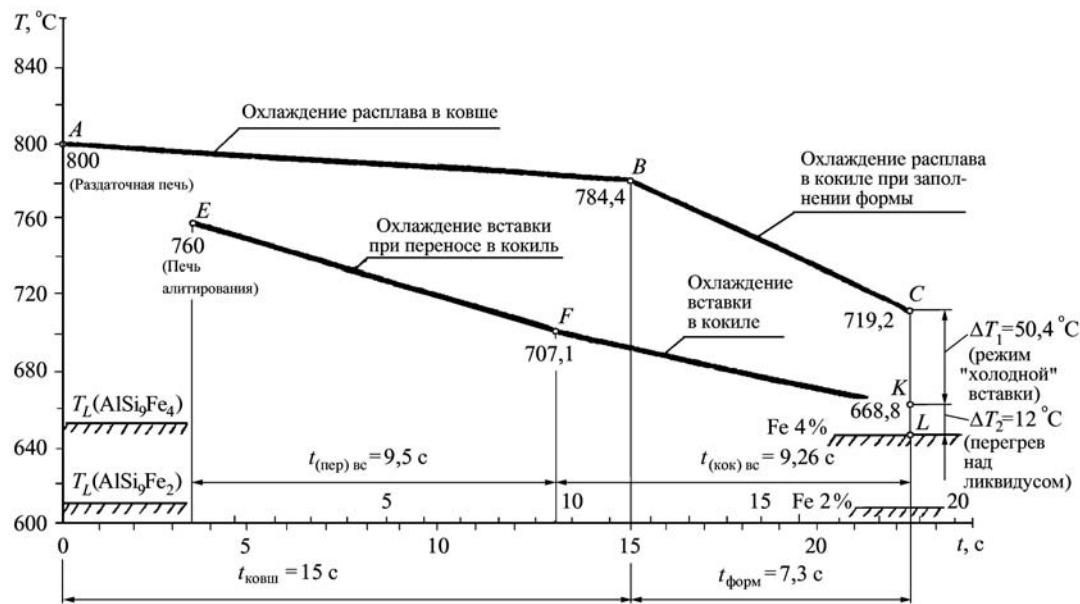


Рис. 5. Тепловые условия формирования отливки дизельного поршня ( $T_{кок} = 200$  °C; краска меловая:  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $\lambda = 0,279$  Вт/(м·К);  $\beta = 558$  Вт/(м<sup>2</sup>·К))

## 1. Факторы для функций отклика

Фактор	Основной уровень	Изменения по технологии процесса	Область максимальных колебаний	Интервал варьирования	Уровень	
					верхний	нижний
$y_1 = T_p - T_{bc}$						
$x_1 = T_{разд.п.}, ^\circ C$	800	820...780	850...720	20	820	780
$x_2 = T_{алит.п.}, ^\circ C$	760	780...740	850...720	20	780	740
$x_3 = T_{кок.}, ^\circ C$	200	Не регламентировано (100...300)	50...400	100	300	100
$x_4 = t_{пер.вс.}, с$	9,5	max 15	6...20	3,5	13	6
$x_5 = t_{пер.ковш.}, с$	15	Не регламентировано (10...20)	10...24	5	20	10
$x_6 = \delta_{kp}$ (меловая), мм	0,5	Не регламентировано (0,3...0,7)	0,2...1,1	0,2	0,7	0,3
$y_2 = T_{bc} - T_L$						
$x_1 = T_{алит.печи.}, ^\circ C$	760	780...740	850...820	20	780	740
$x_2 = t_{пер.вс.}, с$	9,5	Не регламентировано 6...13, max 15	5...20	3,5	13	6
$x_3 = Fe(T_L), \% (^{\circ}C)$	2,5 (620)	1,5...3,5, max 2 (600...640)	1,5...6 (600...700)	1 (20)	35 (640)	1,5 (600)

условиям формирования отливки дизельного поршня с упрочняющей вставкой (рис. 5, формула (3)).

Основные уровни факторов и интервалы их варьирования имеют разные источники. Температуры металла в раздаточной печи  $T_{разд.п}$  и печи алитирования  $T_{алит.п}$  заданы в техпроцессе и контролируются в производстве. Остальные параметры: температура кокиля  $T_{кок}$ , время переноса вставки из печи алитирования в кокиль  $t_{пер.вс}$ , время переноса ковша от раздаточной печи до кокиля  $t_{пер.ковш}$ , толщина слоя меловой краски  $\delta_{kp}$ , содержание железа Fe в алитирующем сплаве и соответствующая ему температура ликвидуса алитирующего сплава  $T_L$  – не регламентированы и не контролируются в действующем производстве, хотя их влияние на тепловые условия и брак отливок несомненны. Поэтому они должны быть заложены в систему автоматического регулирования.

Для замера температуры кокиля и толщины слоя кокильной краски были разработаны соответствующие устройства, временные параметры контролировались хронометражем в условиях производства, содержание Fe – химическим анализом.

По исходным данным, приведенным в первой части табл. 1, была построена матрица планирования полного факторного эксперимента ПФЭ 2<sup>6</sup> для шести факторов с 64 строками, реализующими все возможные сочетания факторов для функции отклика  $y_1$ . Расчет значений  $y_1$  с использованием формулы (3) показал, что в 12 строках из 64 получились отрицательные значения функции отклика  $y_1$ , т.е. при таких неблагоприятных сочетаниях факторов направленного затвердевания

(режима "холодной" вставки) не будет, вставка будет термическим узлом и в области вставки следует ожидать образование газоусадочных дефектов.

По исходным данным, приведенным во второй части табл. 1, была построена матрица планирования ПФЭ 2<sup>3</sup> для трех факторов с 8 строками, реализующими все возможные сочетания факторов для функции отклика  $y_2$ . Расчет показал, что во всех строках, т.е. при всех сочетаниях факторов значения  $y_2$  неотрицательные, а в одной строке  $y_2 = 0$ . Это означает, что алитированная вставка в момент контакта с основным расплавом имеет температуру выше температуры ликвидуса алитирующего сплава, и оксидная пленка, образовавшаяся на поверхности алитирующего сплава при переносе вставки из печи алитирования в кокиль, будет смыта потоком основного расплава и не приведет в образованию брака по спаям в области упрочняющей вставки.

Однако значение  $y_2 = 0$  в одной из строк матрицы делает желательным улучшение ситуации и в отношении функции отклика  $y_2$ , так же как и в отношении функции  $y_1$ . Ситуация может быть улучшена за счет целенаправленного изменения основного уровня и интервала варьирования факторов. Сначала за счет изменения параметров кокильной краски – основного уровня от 0,5 до 0,6 мм и интервала варьирования от 0,2 до 0,1 мм – количество отрицательных значений в матрице для  $y_1$  было уменьшено от 12 до 2, а затем дополнительное ограничение основного уровня содержания Fe от 2,5 до 2 % уменьшило температуру ликвидуса алитирующего сплава от 620 до 610 °C, что вместе

## 2. Факторы для функций отклика

Фактор	Основной уровень	Изменения по технологии процесса	Область максимальных колебаний	Интервал варьирования	Уровень	
					верхний	нижний
$y_1 = T_p - T_{bc}$						
$x_1 = T_{разд.п.}, ^\circ C$	800	820...780	850...720	20	820	780
$x_2 = T_{алит.п.}, ^\circ C$	760	780...740	850...720	20	780	740
$x_3 = T_{кок.}, ^\circ C$	200	Не регламентировано (100...300)	50...400	100	300	100
$x_4 = t_{пер.вс.}, с$	11	max 15	9...15	2	15	9
$x_5 = t_{пер.ковш.}, с$	15	Не регламентировано (10...20)	10...24	5	20	10
$x_6 = \delta_{kp}$ (меловая), мм	0,6	Не регламентировано (0,5 ...0,7)	0,2...1,1	0,1	0,7	0,5
$y_2 = T_{bc} - T_L$						
$x_1 = T_{алит.п.}, ^\circ C$	760	780...740	850...820	20	780	740
$x_2 = t_{пер.вс.}, с$	11	Не регламентировано 9...15, max 15	9...15	2	15	9
$x_3 = Fe(T_L), \% ( ^\circ C)$	2 (610)	1...3, max 2 (590...630)	1...3 (600...700)	1 (20)	3 (630)	1 (590)

с небольшим изменением времени переноса вставки позволило исключить отрицательные значения  $y_1$  и  $y_2$  при любых сочетаниях факторов. Это означает, что брак отливок по газоусадочной пористости и спаям в области упрочняющей вставки исключается. Новые значения факторов приведены в табл. 2.

## Выводы

В результате проведенных расчетов и экспериментов было установлено.

1. Основное влияние на появление газоусадочных дефектов в области упрочняющей вставки оказывает уменьшение до 0,3 мм толщины слоя теплозащитной краски на кокиле. Было рекомендовано контролировать толщину краски и держать ее в пределах 0,5...0,7 мм.

2. Основное влияние на брак по спаям оказывает увеличение содержания Fe в алитирующем сплаве свыше 3 % в связи с повышением температуры ликвидуса алитирующего сплава. Рекомендовано строго контролировать содержание Fe в алитирующем сплаве и заменять его каждую смену.

Использование рекомендаций позволило снизить брак отливок дизельных поршней с упрочняющей вставкой.

Для уточнения тепловых условий формирования отливки поршня с упрочняющей вставкой были проведены расчеты с использованием системы автоматизированного моделирования литейных процессов LVMFlow (НПО МКМ, Россия).

Взяв за начальные условия значения основного уровня факторов для функции отклика  $y_1$  моделирование показало, что газоусадочные дефекты в районе упрочняющей вставки не обнаруживаются, а есть лишь незначительное уменьшение плотности отливки в нижней, дальней от питателя, зоне поршня. Стоит, однако, отметить, что анализ поля распределения микропористости в отливке демонстрирует незначительную ее концентрацию в районе упрочняющей вставки (рис. 6, см. обложку).

Таким образом, моделирование подтвердило результаты, полученные с использованием модели малой интенсивности охлаждения и позволило выявить эффект некоторого искажения температурного поля в связи с односторонним боковым расположением литниковской системы (рис. 7, см. обложку). Влияние этого фактора на появление брака отливок требует дальнейшего теоретического и экспериментального изучения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки: в 2 ч. М.: Машиностроение, 1976–1979.
- Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 292 с.
- Технический отчет по темам Т4-13/90/139 и Т4-13/92/236 МАСИ-МЗАЛ. М., 1991–1992.

Леонид Евгеньевич Кисиленко, канд. техн. наук, kafed14@rambler.ru;  
Борис Витальевич Бычков, аспирант;  
Виталий Эдуардович Фуфаев, студент

**В.С. Шуляк, Б.В. Бычков, П.Н. Опыхтин**  
*(Московский государственный индустриальный университет)*

## Сополимер CL600 для производства отливок литьем по газифицируемым моделям

*В результате исследования свойств модельного материала Cleapor CL600 для производства отливок литьем по газифицируемым моделям установили: оптимальные время и давление вспенивания, значение газотворности сополимера (в 2,5 раза выше, чем полистирола), температурные и временные параметры заливки.*

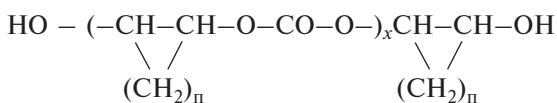
*As result of properties exploration of modelling material Cleapor CL600 for production of casts by moulding on gasifiable sample pieces have fixed: optimum time and pressure of foaming, value of gassing copolymer in 2,5 times above, than polystyrene, temperature and time parameters of pouring-in which are fixed for sample pieces from expanded polystyrene are necessary for applying with some updating*

**Ключевые слова:** газифицируемая модель; сополимер; полистирол; полиметилметакрилат.

**Keywords:** gasifiable samp; copolymer; polystyrene; polymethylmethacrylate.

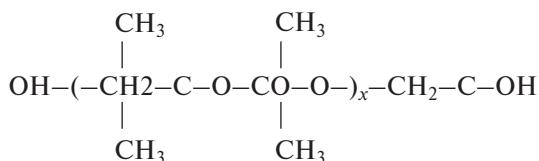
В настоящее время производители отливок литьем по газифицируемым моделям используют для изготовления моделей супензионный полистирол различных марок, из которого путем двухстадийной переработки получают модели [1]. Однако даже применение специального литейного полистирола не гарантирует получение отливок без специфических дефектов, а при получении отливок из низколегированных сталей – поверхностного и объемного науглероживания. Поэтому многие фирмы продолжают работы по созданию новых полимерных материалов для моделей и улучшению уже существующих марок литейного полистирола.

В Японии был получен материал для моделей, который представлял собой сополимер циклопентаноксида, циклогексаноксида и циклогентаноксида или изобутиленоксида при взаимодействии с CO<sub>2</sub>. Структурная формула нового материала имеет следующее строение:



где n = 3, 4 или 5.

Сополимер на основе изобутиленоксида имеет структуру:



В обеих формулах x = 300...350, молекулярная масса поликарбонатов составляет (30...50)·10<sup>-3</sup>. Температура стеклования – 125 °C, начала деполимеризации – 280 °C. Содержание порообразователя в гранулах поликарбонатов (n-пентана) составляло 7 %. Гранулы вспенивались в атмосфере пара при нормальном давлении до объемной массы 0,03 г/см<sup>3</sup>. При повторном вспенивании их объемная масса уменьшалась до 0,016 г/см<sup>3</sup>. Промышленное испытание нового материала при производстве отливок из чугуна показало отсутствие на их поверхности следов коксового остатка.

В работе [1] сообщается о применении для моделей пенополипропилена, который был опробован при получении отливок из стали. Результаты исследования качества отливок показали значительное снижение дефектов, связанных с остатками неполной газификации материала модели. Новый материал был рекомендован для производства отливок из чугуна и стали.

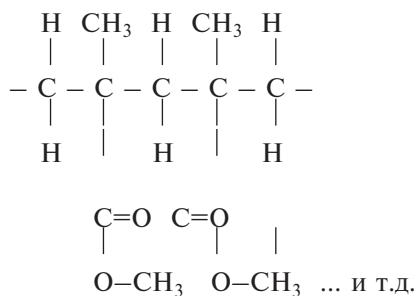
Особый интерес у производителей отливок вызвало сообщение фирмы Dow Chemicals (США), сделанное в 1986 г., о разработке нового материала для моделей на основе полиметилметакрилата (PMMA). Работа была выполнена по заданию фирмы Auto Alloys Foundries. Испытание нового материала проводила фирма General Motors. Сравнительные испытания PMMA при различных скоростях нагрева до температуры 1400 °C представлены в табл. 1.

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что PMMA обладает высокой скоростью газификации при минимальном коксовом остатке, который в 20 раз меньше, чем у литейного полистирола. Такие

## 1. Сравнительные результаты испытания материалов

Модельный материал и условия эксперимента	Остаток по массе, %, при скорости нагрева, °C/с	
	1	700
Пенополистирол	6,2	15,1
Сополимер стирола с акрилонитрилом	9,8	11,55
Полиметилметакрилат	0,3	18
Выдержка при температуре в процессе опыта, с	6,7	18
Атмосфера	Воздух	Азот

свойства нового материала вытекают из строения его структуры:



Наличие в структуре связанного кислорода и отсутствие тяжелых радикалов способствует быстрому протеканию процесса высокотемпературной окисительно-термодеструкции PMMA с выделением главным образом газов при незначительном количестве свободного углерода. Это было подтверждено натурными испытаниями при получении отливок из углеродистой стали. При объемной плотности модели 20...27 кг/м<sup>3</sup> объемное науглероживание стальной отливки не превышало 0,05 %, в то время как при литье по моделям из пенополистирола объемное науглероживание достигало 0,3 %. Вспенивающий агент (углеводородное соединение) имеет меньшую подвижность, чем пентан, и не выделяется из гранул так быстро, как пентан из пенополистирола, что увеличивает сроки хранения и уменьшает усадку моделей после их изготовления. Усадка моделей из PMMA составляет 0,2...0,4 % против 0,7...1,0 % из пенополистирола.

Исходный материал может храниться до 6 мес. без существенной потери вспенивающего агента в гранулах. После вспенивания гранулы могут храниться при нормальных условиях несколько дней до их применения для изготовления моделей. Температура стекловидования PMMA выше на 5 °C, чем у полистирола, поэтому вспенивание гранул необходимо производить при более высокой температуре.

Однако PMMA имеет существенные недостатки. Модели из него имеют низкую механическую прочность и легко деформируются под нагрузкой, поэтому необходимо повышать плотность моделей в 2–3 раза,

а это приводит к увеличению объема выделения газов, в том числе свободного углерода.

Высокая скорость термодеструкции моделей из PMMA при производстве отливок из черных металлов затрудняет применение форм из кварцевого сухого песка, так как при заливке формы металлом образуется значительный зазор между расплавом и моделью, что приводит к обвалу формы. Поэтому форма и покрытие должны иметь высокую газопроницаемость для предотвращения выброса металла из формы во время ее заливки.

Необходимо применять сифонный подвод металла, повышенный гидростатический напор металла при его заливке в форму и вакуум. Следует также учитывать, что стоимость PMMA в 8–10 раз выше литейного пенополистирола. В результате новый материал еще не получил широкого применения для производства моделей.

Однако, по данным фирмы Saplest (Франция), добавление в небольших количествах PMMA в литейный пенополистирол существенно улучшает термодеструкционные свойства моделей и приводит к некоторому улучшению качества отливок из чугуна. Работы в этом направлении привели к разработке новых материалов для изготовления моделей.

Китайская фирма Castchem LTD, Mrs. Ling Hung поставляет для изготовления моделей сополимер "Co-polymer Cast Pro TM" (Cast Pro™), состоящий из 70 % полиметилметакрилата и 30 % полистирола. Основные свойства данного материала приведены в табл. 2.

По данным фирмы материал рекомендуется для производства отливок из чугуна и всех марок стали. Он значительно снижает затраты на производство отливок и повышает их качество. При его применении происходит реальное снижение дефектов, обусловленных наличием углерода, и улучшается качество поверхности отливок. Срок годности материала составляет 6 месяцев при температуре хранения не выше 10 °C.

Японская фирма ISP Corporation поставляет на рынок для изготовления моделей Co-polymer двух марок: Cleapor CL500A и Cleapor CL600A, содержащий 70 % полиметилметакрилата и 30 % полистирола. Гранулометрический состав 0,5...0,4 мм. Рекомендуемая плотность моделей 22...28 кг/м<sup>3</sup>. В основном модели при-

## 2. Физико-механические свойства сополимера Cast Pro™

Марка	Зернистость, мм	Количество вспенивателя, %	Рекомендуемая плотность, г/л	Количество смазки, %
CP2	0,466...0,605	8,0...9,5	20...23	
CP3	0,358...0,466	8,5...9,5	21...25	0,32
CP4	0,284...0,358	9,5...10	23...28	

### 3. Примерный состав сополимера по данным производителя

Наименование компонента	Содержание, %
Метилметакрилат, стирол	90,5
Пентан	7,0
Ксиол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	1,0
Остаточный метилметакрилат	1,0
Остаточный стирол	0,5

меняются при производстве отливок из чугуна и стали с целью значительного снижения влияния углерода термодеструкции модели на качество отливок. По своим технологическим и физическим параметрам он мало чем отличается от Cast Pro™, поставляемого китайской фирмой.

Ниже приведены исследования сополимера CL600 фирмы ISP Corporation. Состав сополимера по данным производителя представлен в табл. 3.

Ниже приведены некоторые физико-механические свойства сополимера CL600:

- содержание полиметилметакрилата – 70 % и полистирола – 30 %;
- плотность сополимера при 25 °C ~1150 кг/m<sup>3</sup>;
- гранулометрический состав: 0,5 мм – 16 %; 0,43 мм – 68,7 %, 0,36 мм – 13,8 % и 0,3 мм – 0,6 %;
- температура стеклования полиметилметакрилата – 100 °C;
- температура стеклования полистирола – 81 °C;
- температура начала термодеструкции сополимера – 300 °C.

На рис. 1 представлен график пиролиза вспенивающегося полистирола и сополимера LC600, откуда следует, что начиная с температуры пиролиза сохраняется постоянная величина разницы в объеме выделяемых газов между ними, равная около 220 см<sup>3</sup>.

Далее представлены результаты исследования сополимера CL600.

1. *Предварительное вспенивание* производили в паровой ванне над паром при температуре 98...99 °C. Ре-

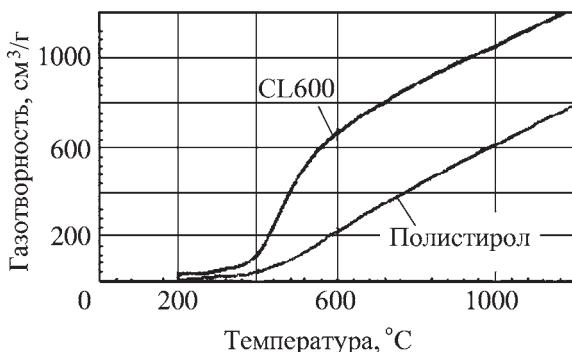


Рис. 1. Пиролиз сополимера CL600 и пенополистирола

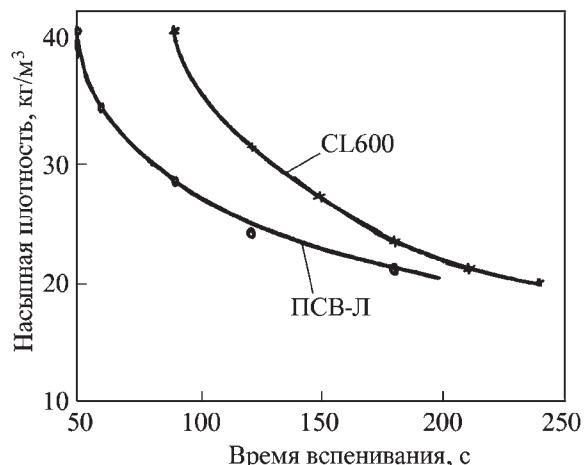


Рис. 2. Зависимость плотности вспененного сополимера от времени вспенивания над паром в паровой ванне:  
CL600 – сополимер; ПСВ-Л – полистирол

зультаты представлены на рис. 2. Из вспененного сополимера изготавлия стандартные пробы ( $\varnothing 50 \times 50$  мм), по качеству поверхности которых определяли оптимальное время вспенивания исходного полимера. Для сополимера наилучшие результаты по спекаемости гранул, качеству поверхности образца и прочности получены при плотности образца 25 кг/m<sup>3</sup>.

2. *Исследование процесса изготовления модели при автоклавном способе.* В работе использовали автоклав медицинский ГК-100, пресс-форму для получения модели размером 180×120×25 мм. В первом варианте применяли пресс-форму без перфорации стенок. Отработку технологии изготовления модели производили при давлении пара 0,14...0,2 МПа. Время спекания модели изменяли от 2,5 до 15 мин. В результате исследования были получены некачественные модели вследствие плохой спекаемости гранул как по поверхности, так и внутри модели. Наилучшие результаты были получены при давлении пара 0,18 МПа и времени спекания 2,5 мин. На рис. 3 показана поверхность модели, полученной при данном режиме.

На поверхности модели четко видны плохо спеченные гранулы сополимера. Поверхность рыхлая. На рис. 4 представлен излом модели, на котором четко просматривается большое количество не спеченных

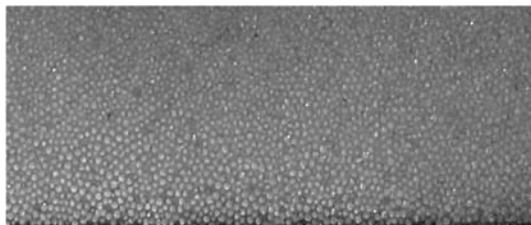


Рис. 3. Поверхность модели из сополимера CL, полученной при давлении пара 0,18 МПа

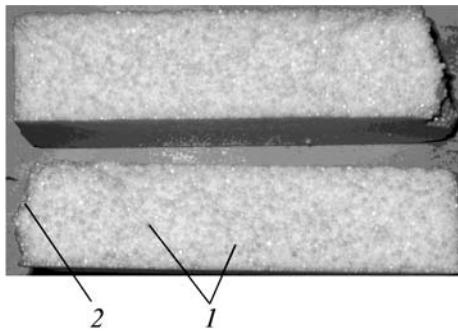


Рис. 4. Излом образца, изготовленного в пресс-форме без перфорации:

1 – неспеченные гранулы сополимера; 2 – рыхлота

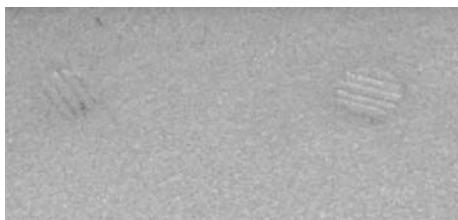


Рис. 5. Поверхность модели, полученной по пресс-форме с вентами

между собой гранул. Образец практически не имел прочности на изгиб.

Для отработки технологии спекания была изготовлена новая пресс-форма с установкой вент  $\varnothing 10$  мм с шагом 25 мм по всей рабочей поверхности пресс-формы. На рис. 5 представлена поверхность модели, изготовленной в перфорированной пресс-форме. На поверхности видны следы вент. Поверхность гладкая, следов неспеченных гранул нет.

На рис. 6 представлен излом модели, показанной на рис. 5; края четкие, структура спеченная, рыхлот нет.

Исследования показали, что получить модель из сополимера в пресс-формах без перфорации невозможно. В таких пресс-формах процесс спекания гранул происходит за счет теплопроводности самого сополимера, которая весьма низка. Учитывая, что температура пластической деформации полиметилметакрилата выше 100 °C, повысить данную температуру в пресс-форме без перфорации из-за низкой теплопро-



Рис. 6. Излом модели, представленной на рис. 5. Края четкие, структура спеченная, рыхлот нет

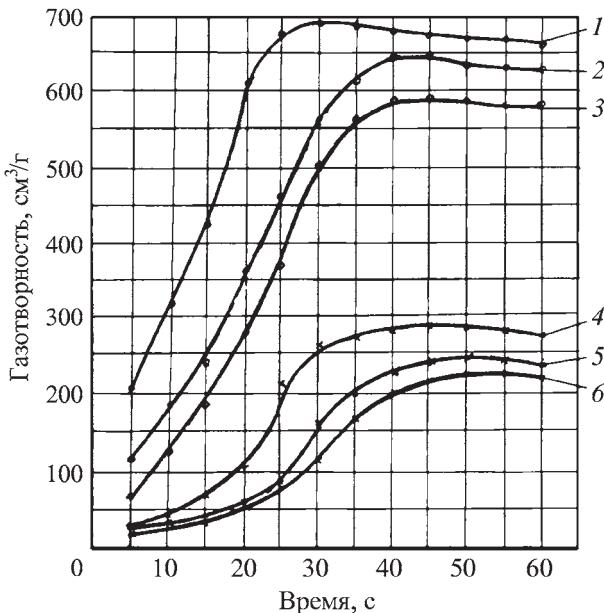


Рис. 7. Зависимость газотврности сополимера (1–3) и полистирола (4–6) от температуры:

1, 4 – 900 °C; 2, 5 – 800 °C; 3, 6 – 700 °C

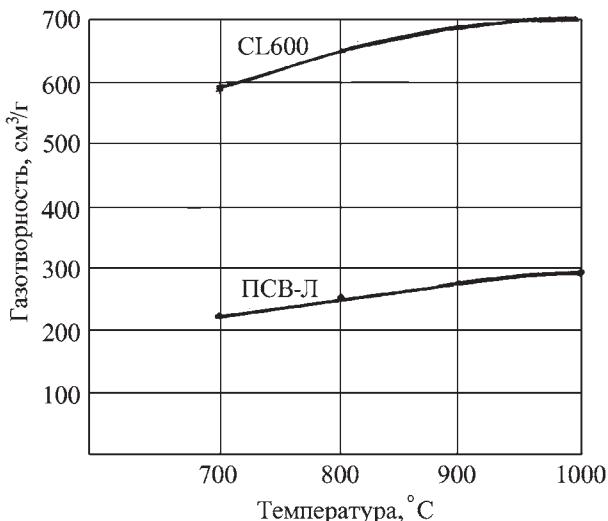
водности гранул нельзя. При установке вент пар под давлением 0,18 МПа поступает непосредственно между гранулами при температуре 125...135 °C, что и приводит к хорошему их спеканию и получению качественных моделей.

3. Исследование газотврности сополимера. Исследование газотврности сополимера производилось по стандартной методике в металлургической лаборатории завода ЗИЛ. Одновременно были произведены исследования полистирола. На рис. 8 представлены результаты исследования.

Анализ газотврности сополимера и полистирола показывает, что газотврность сополимера в 2,5 раза превышает газотврность полистирола, однако при этом время газификации у них практически совпадает, что говорит о том, что время газификации зависит от теплофизических свойств материалов, которые у них примерно равны, а количество газа – от структуры полимера. Это имеет принципиальное значение при определении скорости заливки формы с использованием моделей из разных материалов.

На рис. 8 представлена зависимость газотврности сополимера и полистирола от температуры.

4. Исследование качества отливок из стали при литье по модели из сополимера. В экспериментах применяли модель, полученную в пресс-форме без перфорации (без вент) размером 180×120×25 мм. Заливку производили хромоникелевой сталью с содержанием углерода 0,47 % при расчетной скорости заливки в 2 раза выше оптимальной. Модельный блок окрашивали огнеупорной краской на основе электрокорунда. Блок формовали в песке, форму уплотняли вибрацией. За-



**Рис. 8. Зависимость газотворности полимера от температуры**

ливку производили под вакуумом. На рис. 9 представлена полученная отливка после выбивки.

Анализ содержания углерода в отливке в нижней, средней и верхней частях показал незначительный прирост углерода за исключением нижней части отливки. В нижней части отливки объемное приращение углерода составило 0,02 %, в остальных частях отливки прирост углерода не обнаружен.

Однако высокая скорость заливки формы металлом привела к получению специфических для такого случая дефектов: образованию поверхностных

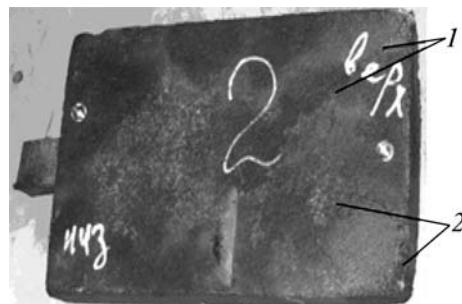


Рис. 9. Отливка из хромоникелевой стали:

*1* – след движения металла в режиме охвата; *2* – дефекты на поверхности отливки как результат накопления жидкой фазы

дефектов в результате захвата и скопления жидкой фазы термодеструкции сополимера. Это говорит о том, что при применении сополимера в качестве материала моделей необходимо соблюдать температурные и временные параметры заливки, которые установлены для моделей из пенополистирола с некоторой корректировкой.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО "Профессионал", 2007.

*Валентин Саввович Шуляк, д-р техн. наук,  
kased14@rambler.ru;  
Борис Витальевич Бычков, аспирант;  
Павел Николаевич Опыхтин, аспирант*

УДК 669.018.2:669.715

**А.А. Антонов\*, О.И. Стеклов, А.А. Антонов (мл.), Ю.В. Сидорин\*\***  
(\*Московский государственный индустриальный университет;  
Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина;  
\*\*Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва)

## **Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов**

*Рассмотрена конструкция комплекса "ДОН-7" для диагностики напряжений в сварных конструкциях. Показана эффективность применения данного прибора. Исследованы технологические остаточные напряжения в сварных соединениях, выполненных рекомендованными способами сварки для магистральных трубопроводов.*

The construction of speckle interferometer DON-7 for the stresses diagnostics in constructions is considered. The technological residual pressure in welding joints performed by different kinds of welding used for mains pipes-lines are resulted.

**Ключевые слова:** многослойная сварка; технологические остаточные напряжения; спекл-интерферометрия; интерферограмма.

**Keywords:** multilayer welding; technological residual stresses; speckle-interferometry; interferogramma

Для объективной оценки работоспособности конструкции необходима информация о геометрических параметрах, структурном состоянии материала и на-

пряженно-деформированном состоянии (НДС). Задача получения достоверной информации о первых двух факторах решается с использованием отработан-

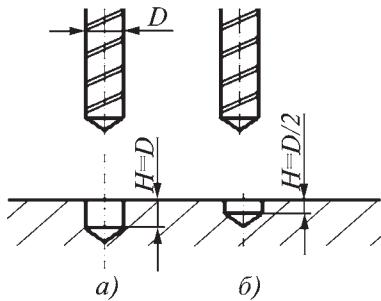
ной методики. Но получение информации о НДС остается проблематичной и в настоящее время.

Проблема состоит в определении истинных напряжений и их распределений по элементам конструкции. Истинные напряжения формируются при наложении полей рабочих напряжений (эксплуатационных) и технологических остаточных напряжений, возникших в процессе изготовления изделия. Сопротивляемость конструкции разрушению определяется истинными напряжениями. В частности, в условиях коррозии под напряжением действует закон "суперпозиции", т.е. сложения напряжений от рабочих нагрузок и остаточных технологических. При превышении их суммарных значений выше критических (пороговых) возникает коррозионное растрескивание [1]. Если диагностика рабочих напряжений не вызывает особых трудностей (применение расчетных моделей), то определение как остаточных, так и истинных напряжений затруднительно. Достоверный расчет остаточных напряжений сложен, так как невозможно учесть абсолютно все, в том числе воздействия на конструкцию в процессе ее изготовления, транспортировки, установки, а также воздействия окружающей среды.

Сложность ситуации состоит в том, что поля технологических остаточных напряжений самоуравновешены внутри конструкции и существуют в ней без приложения внешних нагрузок, не проявляя себя внешне. Основная проблема диагностики остаточных технологических напряжений – выбрать метод проявления напряжений.

Существуют две основные группы экспериментальных методов определения остаточных напряжений – неразрушающие (физические) и разрушающие (механические).

Физические методы базируются на наличии определенных зависимостей между величиной внутренних напряжений и каким-либо физическим параметром материала. Такими параметрами являются: магнитная проницаемость, искажение кристаллической решетки, изменение скорости распространения упругой волны и т.п. [2–4]. Однако на выбранные физические параметры оказывают влияние не только поля внутренних напряжений, но и ряд других факторов. Например, структурные изменения материала конструкции.



**Рис. 1. Геометрия высверливаемого отверстия:**  
а – по стандарту США E837-95; б – по предлагаемой методике

Для учета таких факторов обычно проводятся предварительные тестовые испытания на образцах-эталонах, изготовленных из того же материала, но свободных от полей внутренних остаточных напряжений. Но даже после учета множества дополнительных факторов полученные физическими методами результаты носят качественный, а не количественный характер, и скорее пригодны для контроля НДС типовых изделий, где отклонение от обычного поля является причиной отбраковки конкретного изделия из партии.

В отличие от физических механические методы не зависят от структурного состояния материала и базируются на неизменности модуля упругости, который является его постоянной величиной. Исходя из размера зоны трепанации, данные методы могут классифицироваться как "разрушающие", "полуразрушающие" и "неразрушающие" [5–7].

Механические методы (методы трепанации) отличаются друг от друга способами проявления измеряемых напряжений (разрезка на полоски, квадратики, создание канавок, отверстий, внедрение инденторов и т.п.), вызывающих релаксацию напряжений в зоне возмущения, а также средствами регистрации возмущенного напряженно-деформированного состояния поверхности в этих зонах, т.е. измерения либо перемещений, либо деформаций. Перемещения и деформации при этом измеряются как контактными средствами (тензометрами), так и бесконтактными (оптические системы).

Наиболее перспективным среди этой группы методов является метод засверливания глухого отверстия и регистрации состояния поверхности методами лазерной интерферометрии [9–12]. Считаем необходимым введение термина "засверливание" вместо "высверливание" несквозного отверстия по отношению к описываемому здесь методу (рис. 1). Так как в отличие от американского стандарта E837-95 с использованием тезоразеток [8], предусматривающего создание несквозного отверстия глубиной, равной диаметру, в данном методе создается отверстие глубиной в 2 раза меньше. Соответственно, значительно меньше коэффициент концентрации напряжений, меньше размер привносимого при измерении дефекта от засверливания отверстия. В ряде случаев нормативы допускают наличие в конструкции аналогичных по размеру дефектов, т.е. метод становится не "малоразрушающим", а "неразрушающим".

Кафедра "Оборудование и технология сварочного производства" МГИУ и кафедра "Сварка и мониторинг нефтегазовых сооружений" РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина совместно разработали новый диагностический комплекс "ДОН-7" на основе его предшественника "ДОН-5Ц3" [13, 15].

Общий вид оптического блока представлен на рис. 2.

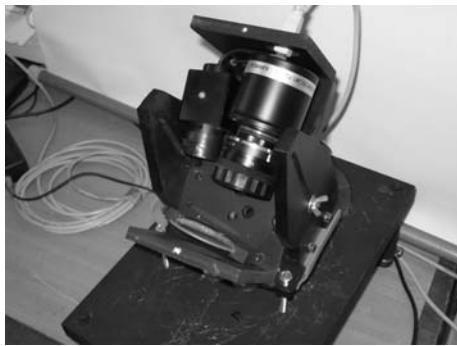


Рис. 2. Оптический блок комплекса "DON-7"

Интерферометр оснащен цифровой видеокамерой "ВИДЕОСКАН-415-USB" и лазерным модулем "KLM-D532-30-5".

Характеристики видеокамеры: формат изображения  $780 \times 582$ ; размер CCD-матрицы  $6,5 \times 4,8$  мм; размер пикселя  $8,3 \times 8,3$  мкм; кадровая частота 25 Гц. Спектральная характеристика видеокамеры представлена на рис. 3. Максимальная чувствительность видеокамеры находится в зеленой области спектра, что позволяет наиболее эффективно применять ее для записи зеленого лазерного излучения (длина волны 532 нм).

Лазерный модуль имеет следующие характеристики: длина волны лазерного излучения 532 нм, расходимость 0,5 мрад, мощность лазерного излучения 30 мВт.

Для диагностического комплекса разработано собственное программное обеспечение — программа "DON-ИОН".

При разработке комплекса были решены задачи: обеспечения стабильного качества интерференционной картины полей перемещений; снижения влияния внешних факторов (вибраций, засветки от внешних источников света и т.п.) на качество интерферограмм; обеспечения надежной фиксации оптического блока на поверхности изделия; наличия возможности оперативной перенастройки оптического блока для измерения напряжений как на плоских поверхностях, так и на поверхностях различной кривизны; устранения вероятности механического воздействия на оптический блок при засверливании зондирующих отверстий; регулирования чувствительности измерений в зависимости от имеющегося уровня остаточных напряжений и т.д.

В интерферометре "DON-7" оптическая плоскость, на которой расположены все оптические элементы (лазер, делительное зеркало,

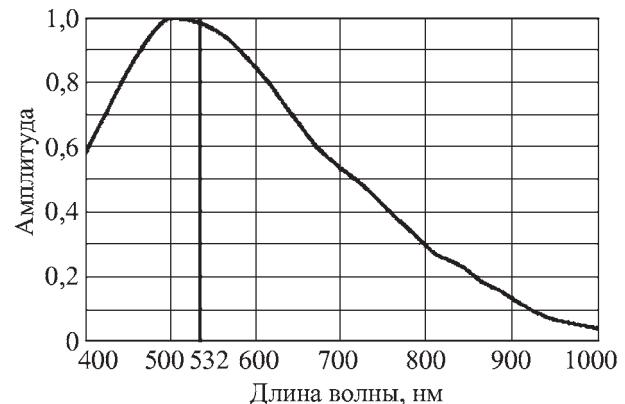


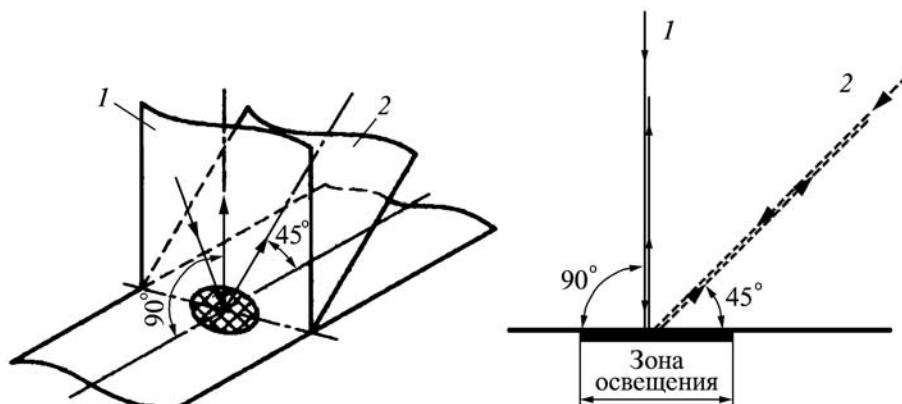
Рис. 3. Спектральная характеристика ПЗС-матрицы видеокамеры

видеокамера и т.д.), может быть зафиксирована либо нормально к поверхности измерения, либо под углом  $45^\circ$  (рис. 4). Подобное техническое решение позволило существенно расширить технологические возможности измерительного комплекса, в том числе повысить чувствительность, возможность измерения напряжений в угловых и тавровых сварных соединениях.

Положения оптического блока при измерениях нормальной и касательной компонент полей перемещений показаны на рис. 5.

Работа программного комплекса "DON-ИОН" включает в себя четыре этапа: предварительная обработка исходных изображений; совмещение изображений; вычитание изображений и обработка разностного изображения.

Определение величины остаточных напряжений по измеренным перемещениям осуществляется по специальным методикам, в основе которых лежит решение трехмерной задачи теории упругости для глухого отверстия [9, 14].

Рис. 4. Ориентация оптической плоскости интерферометра для измерения:  
1 — нормальной компоненты вектора перемещения ( $90^\circ$ ); 2 — наклонной компоненты ( $45^\circ$ )

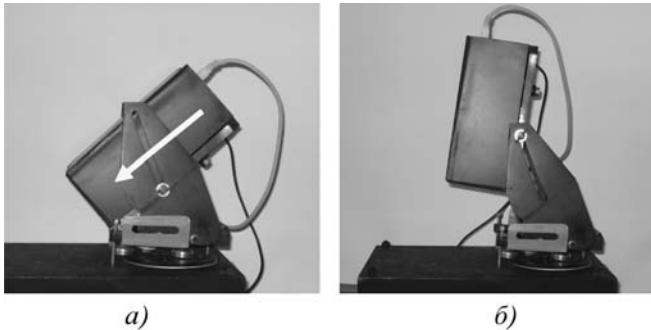


Рис. 5. Положения оптического блока на поверхности при измерении:

*a* – наклонной компоненты; *б* – нормальной компоненты

Методика определения остаточных напряжений по перемещениям возмущенного деформированного состояния основана на предположении, что перемещения или деформации, возникшие в окрестности отверстия, являются упругими. Однако при определении достаточно больших остаточных напряжений при высверливании глубоких отверстий  $h > 2R$  могут возникнуть пластические деформации из-за концентрации напряжений на кромке отверстия. Анализ решений задач о возмущенных напряженно-деформированных состояниях в окрестности отверстий в рамках пространственной теории упругости показал, что с уменьшением глубины отверстия уменьшается коэффициент концентрации напряжений  $K$ , зависимость которого от отношения  $h/R$  приведена на рис. 6. Видно, что при уменьшении отношения глубины  $h$  к радиусу отверстия  $R$  коэффициент концентрации снижается и при  $h/R = 0,4 K = 1,7$ . При отношении  $h/R > 2$  значение  $K$  приближается к 3. Полученная зависимость позволяет выбрать область допустимых  $h/R$ , когда будут отсутствовать пластические деформации от концентрации напряжений, обеспечивая максимальную чувствительность метода.

Картинами полей перемещений нормальной и наклонной компонент возмущенного деформированного состояния в окрестности зондирующего глухого отверстия представлены на рис. 7.

Интерферограмма, как правило, имеет две оси симметрии, которые совпадают с главными осями остаточных напряжений в точке, являющейся центром высверленного отверстия. Количество полос по каждой из осей определяет величину напряжений по этим осям. Интерференционная картина свидетельствует и о знаках напряжений по главным осям. Знак напряжений определяется по характеру сопряжения интерференционной полосы с границей отверстия [16] либо выполнением дополнительной точечной пластической деформации вблизи кромки отверстия (кернение). По взаимодействию интерференционных по-

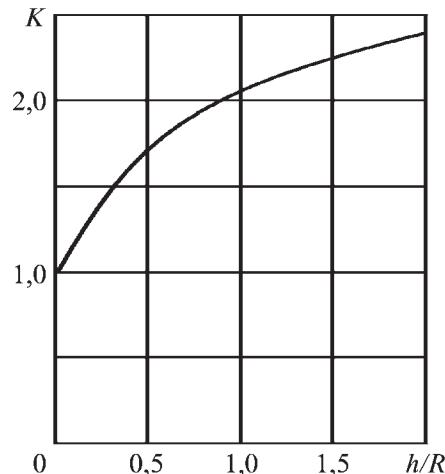


Рис. 6. Зависимость коэффициента концентрации напряжений от отношения  $h/R$

лос от зондирующего отверстия и точечной деформации от кернения определяется знак напряжений (рис. 8).

Разработанный комплекс используется для выполнения фундаментальных исследований и решения конкретных задач в промышленности и строительстве по определению НДС в изделиях.

Авторами проведены исследования остаточных напряжений в сварных стыковых соединениях труб магистральных газопроводов, выполненных из стали класса прочности X80 с толщиной стенки 33,4 мм.

Физическими методами очень сложно исследовать поля напряжений в сварных швах и зоне термического влияния (ЗТВ) из-за изменения физических свойств в литом металле сварного шва и структурных изменениях в ЗТВ.

Применение комплекса "ДОН-7" позволило получить картину распределения остаточных напряжений по поверхности в зоне сварного соединения.

Исследовали поля остаточных напряжений, возникшие после следующих способов сварки:

- механизированная сварка корневого слоя шва проволокой сплошного сечения в углекислом газе +

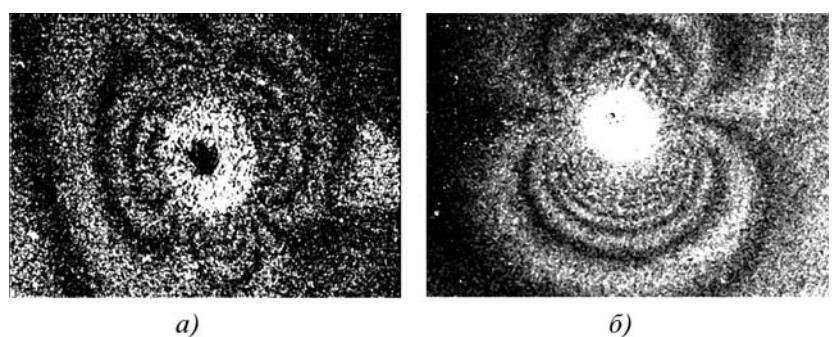


Рис. 7. Характерные интерференционные картины полей перемещений нормальной (*а*) и наклонной компоненты (*б*) в окрестностях глухого зондирующего отверстия

Рис. 8. Определение знака напряжений путем кернения в окрестностях зондирующего отверстия



+ автоматическая сварка горячего прохода, заполняющих и облицовочного слоев шва порошковой проволокой в среде защитных газов;

– ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия методом "на подъем";

– ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия методом "на спуск".

По каждому из выбранных видов сварки были представлены контрольные стыковые соединения (КСС) только после сварки и после сварки и термической обработки. КСС были представлены в виде сваренных труб Ø1420 мм, толщина стенки 34 мм, материал – сталь класса прочности X80. Ширина каждого образца – около 1 м, т.е. по 500 мм в каждую сторону от шва (рис. 9).

Термическая обработка проводилась на следующем режиме: скорость нагрева 400 °C/ч, выдержка в интервале температур 610...630 °C – 1,5 ч; скорость охлаждения до температуры 250 °C – 300 °C/ч.

Для засверливания были применены специальные сверла диаметром от 2 до 5 мм, с содержанием кобальта 5 % и углом заточки 135°. Диаметр отверстия выбирался в зависимости от напряжения, имеющегося в исследуемой точке. Чем меньше напряжение, тем больше диаметр.

*Механизированная сварка.* После сварки максимальные растягивающие напряжения зафиксированы на внешней поверхности в центре шва – 40 МПа.



Рис. 9. Оптический блок комплекса на исследуемом контрольном стыковом соединении

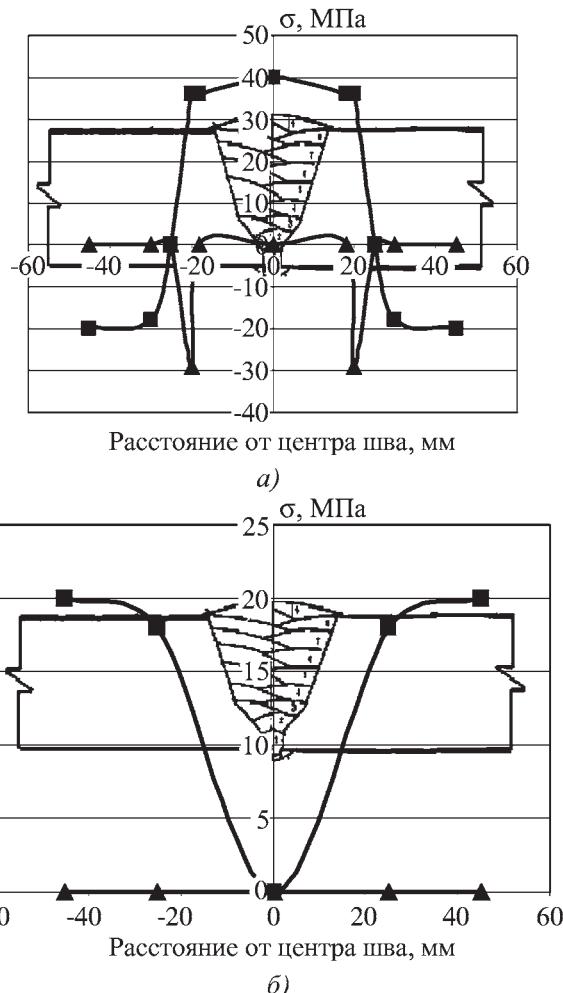


Рис. 10. Остаточные напряжения на внешней поверхности после:

а – механизированной сварки; б – механизированной сварки и последующей термической обработки

Эпюра остаточных напряжений имеет "классический" вид, переходя в область сжимающих напряжений в ЗТВ (рис. 10, а).

После проведения послесварочной термической обработки на внешней поверхности трубы остаточные напряжения в центре шва равны нулю, а на расстоянии 40 мм от шва достигают максимума – 20 МПа (рис. 10, б).

*Ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия методом "на подъем".* После осуществления процесса сварки на внешней поверхности сварного соединения присутствуют растягивающие напряжения в диапазоне 20...54 МПа. Термообработка приводит к изменению знака напряжений на сжимающие, их значения достигают 20 МПа.

*Ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия методом "на спуск".* После этого вида сварки зафиксированы максимальные среди всех исследуемых методов растягивающие послесварочные

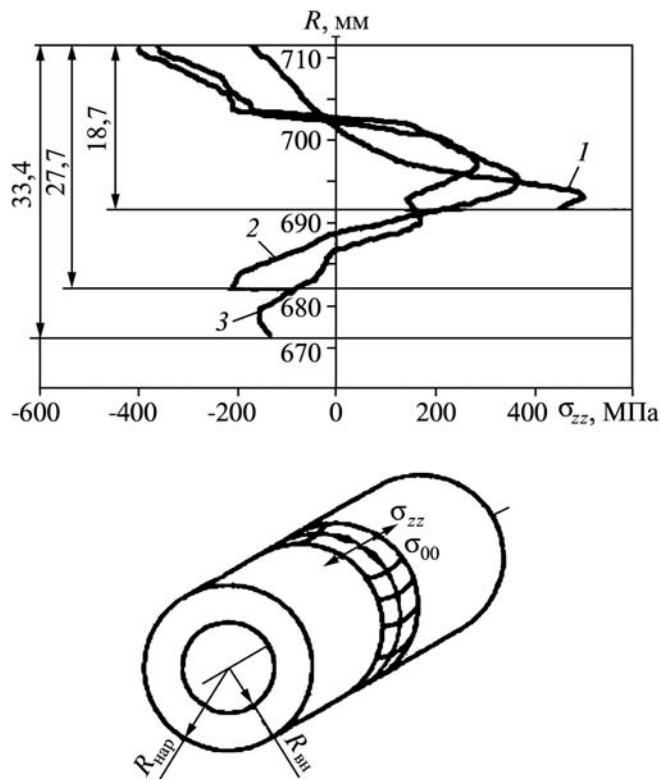


Рис. 11. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{zz}$  по толщине стенки трубы диаметром 1420 мм [18]:

1, 2, 3 – толщина стенки соответственно 18,7; 27,7 и 33,4 мм

напряжения (в центре шва) 108 МПа. Необходимо отметить, что предел текучести исследуемых сталей составляет примерно 550 МПа, т.е. остаточные напряжения составляют менее 20 % от предела текучести.

Одновременно с описываемым методом проводились параллельные работы по измерению остаточных напряжений методом магнитной памяти, магнитошумовым методом и тензометрированием. Полученные результаты подтвердили, что максимальные значения остаточных напряжений не превышают 20 % от  $\sigma_t$ .

Заслуживают внимание результаты определения остаточных напряжений в сварных соединениях, полученных расчетным путем с использованием метода конечных элементов (МКЭ), для рассматриваемых случаев [17]. На рис. 11 показан характер распределения остаточных напряжений по толщине стенки труб разной толщины в поперечном сечении по оси шва для механизированной сварки. Величина остаточных напряжений на поверхности трубы в сварном шве близка к величине, определенной экспериментальным методом отверстий, и имеет тот же знак.

Известно, что при сварке труб большой толщины (более 30 мм) рекомендуется проводить послесварочную термическую обработку в условиях холодного климата, что значительно усложняет и удорожает технологию монтажа.

Полученные результаты позволяют предположить, что после выполнения дополнительных более глубоких исследований окажется возможным отказаться от проведения послесварочной термической обработки для снятия остаточных напряжений в соответствии с требованиями СТО ОАО "Газпром".

### Заключение

Был разработан и опробован в полевых условиях диагностический комплекс "ДОН-7" для оперативного измерения напряжений в сварных конструкциях, который показал свою эффективность: оперативность, надежность и достоверность полученной информации.

При помощи прибора были определены остаточные напряжения в сварных соединениях труб магистрального трубопровода, выполненных рекомендуемыми способами сварки ОАО "Газпром".

Установлено, что после многослойной сварки различными методами труб класса прочности X80 с толщиной стенки 33,4 мм и диаметром 1420 мм остаточные сварочные напряжения в соединении не превышают 20 % от предела текучести, что не исключает возможности отказа от послесварочной термообработки стыков труб.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. М.: Машиностроение, 1990. 364 с.
- Венгринович В.Л., Цукерман В.Л., Бусько В.Н. Магнитошумовой метод и аппаратура для измерения напряжений в ферромагнитных материалах // Матер. III Всесоюзн. симп. "Технологические остаточные напряжения". М.: ИПМ РАН, 1988. С. 101–105.
- Патон Б.Е., Труфяков В.И., Гуша О.И. и др. Ультразвуковой неразрушающий метод измерения напряжений в сварных конструкциях. Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. Киев: Наукова думка, 1986. 220 с.
- Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction. Ed. Hillel M.E., SAE J784a, Soc. Auto. Eng. Warrendale, PA, 1971. 20 р.
- Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
- Курносов Д.Г., Якутович М.В. Измерение остаточных напряжений методом вы сверливания отверстий // Заводская лаборатория. 1946. Т. 12. № 12. С. 960–967.
- Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. М.: Машиностроение, 1968. 236 с.
- Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia PA, V.03.01, E837-95, 1995. 7 р.
- Антонов А.А., Бобрик А.И., Морозов В.К., Чернышев Г.Н. Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерференции

- рометрии // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1980. № 2. С. 182–189.

10. **Антонов А.А.** Определение уровня остаточных напряжений в сварных соединениях лазерной интерферометрией // Сварочное производство. 1983. № 3. С. 29–31.

11. **Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Андрущенко С.Т.** Переносной голографический модуль для определения остаточных напряжений // Труды II Всесоюзн. симп. "Остаточные технологические напряжения". М.: ИПМ РАН, 1985. С. 215–219.

12. **Nelson D.V., McCrickerd J.T.** Residual-Stress Determination Through Combined Use of Holographic Interferometry and BlindHole Drilling // Proc. of the Society for Experimental Mechanics. 1986. V. 43. P. 371–378.

13. **Антонов А.А., Чернышев Г.Н., Овчинников В.В., Замалетдинов Э.Р.** Исследование уровня напряжений в сварных соединениях из алюминиевого сплава 1460 // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 8. С. 20–24.

14. **Антонов А.А., Морозов В.К., Чернышев Г.Н.** Изменение напряжения методом голографирования возмущенной поверхности тела // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1988. № 3. С. 185–189.

15. **Антонов А.А., Капустин О.Е.** Оптико-электронный интерферометр для измерения остаточных напряжений // Технология машиностроения. 2008. № 3. С. 45–52.

16. **Одинцов И.Н., Щепинов В.П., Щиканов А.Ю.** Применение голографической интерферометрии для измерения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. № 11. С. 106–110.

17. **Пономарева И.Н.** Расчетное обоснование исключения послесварочной термической обработки стыков магистральных трубопроводов из высокопрочной стали класса X80 большой толщины // Сварка и Диагностика. 2009. № 4. С. 23–27.

Алексей Алексеевич Антонов, д-р техн. наук,  
trp91@rambler.ru;

Олег Иванович Стеклов, д-р техн. наук:

Алексей Алексеевич Антонов (мл.), канд. техн. наук;  
Юрий Васильевич Сидорин, канд. физ.-мат. наук

УДК 621.791.85

В.Н. Ластовиця (Московский государственный индустриальный университет)

## Экспериментальная методика идентификации уравнения связи для оценки формы проплава в ходе электронно-лучевой сварки

Рассмотрена методика параметрической идентификации системы алгебраических уравнений, связывающих глубину и ширину проплава сварного шва с регистрируемыми переменными процесса электронно-лучевой сварки на основе метода энергетического баланса пучка. Это открывает возможность текущего контроля и управления формой проплава при сварке деталей ответственного назначения.

The method of parametric identifying of algebraic equation system for depth and width of weld bead with registered process variables of electron-beam welding based on energetic balance ray is discussed. This method provides ability to control and to manage the form of smelting rate in high responsible materials welding.

**Ключевые слова:** параметрическая индентификация; энергетический баланс; уравнения связи; форма проплава; электронно-лучевая сварка.

**Keywords:** parametric identifying; energetic balance; equation of connection; fusion zone form; electron-beam welding.

**Введение.** Способ электронно-лучевой сварки (ЭЛС) применяется не только при необходимости глубокого проплавления, но также при сварке изделий малой толщины в основном для изготовления сварных конструкций и изделий ответственного назначения из химически активных и тугоплавких металлов, например в атомной энергетике. Процесс сварки выполняется в вакууме, что обеспечивает высокое качество соединения.

Однако к результатам сварки подобных изделий, их повторяемости от изделия к изделию предъявляются повышенные требования, в частности к форме проплава сварного шва. Нестабильность формы наблюдается как вдоль сварного шва, так и от изделия к изделию, что недопустимо при сварке конструкций ответственного назначения. Кроме того, незнание формы проплава в данный момент диктует необходимость периодической сварки образцов-свидетелей для ее

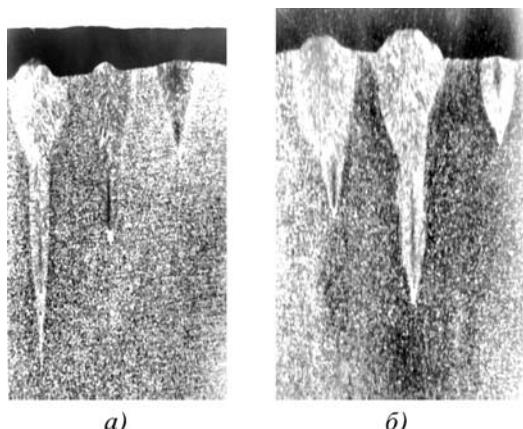
контроля, что снижает эффективность технологии ЭЛС. Введение контроля или управления текущей формой проплава обеспечивает надежность выполнения требований технологии.

Сущность процесса ЭЛС состоит в воздействии на соединяемые материалы пучком ускоренных электронов, кинетическая энергия которых при их торможении превращается в теплоту. Значения плотности мощности при нагреве превышают  $10^6 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , что дает скорость ввода тепла большую, чем скорость его диссиpации. В условиях инерции тепла происходит интенсивный локальный нагрев, плавление и испарение металла. Сила реакции паровой струи "продавливает" в расплаве каверну – парогазовый кратер. При перемещении кратера осуществляется формирование сварного шва, размеры и форма проплава которого в первом приближении, без учета гидродинамики расплава сварочной ванны, определяются размерами и формой кратера. Сама же форма определяется энергетическим балансом электронного пучка [1].

Как правило, сварочные электронные пучки осесимметричные с нормальным круговым распределением плотности мощности по сечению. Формируемый таким пучком парогазовый кратер в меридиональном сечении также можно представить гауссовой кривой, но ее параметры не соответствуют параметрам, принятым в сварочном производстве для характеристики шва, а именно глубине проплава  $H$  и ширине шва  $B$ .

С этих позиций целесообразно форму кратера аппроксимировать параболоидом вращения [2]. Тогда основными параметрами, характеризующими форму проплава в сечении, перпендикулярном сварному шву, – параболу  $S(r, z)$  – можно считать глубину  $H$  и радиус горловины кратера  $R$ :

$$\frac{z}{H} = 1 - \frac{r^2}{R^2}, \quad (1)$$



**Рис. 1. Макрошлифы проплавов в стали типа 12Х18Н10Т:**  
а – нормальный катод ( $H = 8,8 \text{ мм}$ ;  $B = 5,2 \text{ мм}$ ); б – изношенный катод с отверстием диаметром  $0,4 \text{ мм}$  ( $H = 6,7 \text{ мм}$ ;  $B = 6,2 \text{ мм}$ )

где  $H$  и  $R = B/2$  – указанные параметры, определяющие конкретный вид выражения формы кратера (1).

Анализ показывает, что наибольший уровень возмущений на источник энергии оказывается в процессе термоэмиссии с катода электронного генератора [2]. Разрушение катода происходит за счет процессов распыления и испарения его материала. Интенсивность процесса катодного распыления определяется силой тока пучка и давлением остаточных газов в электронной пушке.

Так при больших токах унос материала с поверхности катода может достигать  $0,01...0,1 \text{ мм}/\text{ч}$ . В центре катода образуется углубление диаметром  $0,3...0,4 \text{ мм}$ , которое за  $10...20 \text{ ч}$  непрерывной работы пушки может составить значительную долю толщины катода [3, 4].

Наибольшее влияние катодное распыление оказывает за счет деформации поверхности катода. Это изменяет характер распределения плотности тока в пучке, уменьшает поверхность эмиссии, ее однородность, что в конечном итоге изменяет характеристики пучка как источника энергии для сварки. Как следствие форма проплава (рис. 1) заметно отклоняется от исходной. Это недопустимо при сварке изделий ответственного назначения и требует периодического контроля.

**Постановка задачи.** Энергия электронного пучка в процессе ЭЛС расходуется на нагрев, плавление металла и излучение из кратера. Первые две составляющие отводятся в изделие вследствие теплопроводности, а третья – за счет обратных электронов, парового и теплового потоков во внешнюю среду. Таким образом, энергетический баланс пучка в парогазовом кратере определяется двумя компонентами: поглощаемой изделием мощностью и излучаемой наружу, значения которых определяются формой и площадью поверхности парогазового кратера. Это предполагает наличие интегральной связи между данными компонентами и геометрическими параметрами формы проплава формируемого сварного шва [1], что позволяет идентифицировать уравнение связи, которое можно использовать для оценки текущих параметров формы проплава по наблюдениям упомянутых компонент.

К сожалению, иногда весьма затруднительно интегрированием получить уравнения связи параметров формы проплава с компонентами энергетического баланса. В этих случаях можно предложить экспериментальный подход, базирующийся на методах регрессионного анализа и понятиях обратного отображения и композиции отображений.

Будем рассматривать процесс сварки, предполагая квазистационарность источника нагрева (протяженность шва относительно мала) и оперируя средними значениями величин. Принимаем энергетический баланс электронного пучка на поверхности парогазового кратера в виде, когда полная энергия пучка представляется в виде двух компонент, а именно:  $P_{\text{п}}$  – составляющей, поглощаемой изделием путем теплоот-

вода и  $P_u$  – составляющей, испускаемой во внешнее пространство [1].

Множество пар значений  $(P_n; P_u)$  образуют линейное метрическое пространство компонент энергетического баланса, которое обозначим  $\Omega$ . Аналогично множество пар значений геометрических параметров формы кратера  $(H; B)$  образуют линейное метрическое пространство параметров шва  $G$ . Будем искать упомянутую выше связь между этими множествами в виде некоторого оператора  $A$ , осуществляющего отображение  $\Omega \rightarrow G$ . Для этого зададим некоторую область – ограниченное замкнутое множество  $G_i \subset G$ .

Выбор данной области параметров шва определяется, с одной стороны, требованиями технологии сварки на форму шва и обязательно включает требуемые значения глубины  $H_0$  и ширины  $B_0$  проплава (то есть  $(H_0; B_0) \in G_i$ ) с учетом допуска на отклонение этих параметров. С другой стороны, соответствующая этой области область компонент энергетического баланса  $\Omega_i \subset \Omega$  не должна быть слишком большой, чтобы отображение прообраза  $\Omega_i$ , осуществляемое оператором  $A$ , оставалось линейным и взаимно-однозначным.

Тогда каждой паре  $(P_n; P_u)$  – элементу области  $\Omega_i$  – будет соответствовать единственный элемент области  $G_i$  – пара  $(H; B)$  или, другими словами, имеет единственное решение уравнения

$$\begin{pmatrix} h \\ b \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} p_n \\ p_u \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\begin{pmatrix} h \\ b \end{pmatrix}$  и  $\begin{pmatrix} p_n \\ p_u \end{pmatrix}$  – векторы-столбцы переменных состояния процесса ЭЛС, заданных относительно нового начала координат во введенных областях. Причем  $(h; b)^T \in G_i$  с началом координат в точке  $(H_0; B_0)^T$ , а  $(p_n; p_u)^T \in \Omega_i$  с началом координат в точке  $(P_{n0}; P_{u0})^T$  и справедливо соотношение

$$\begin{pmatrix} P_{n0} \\ P_{u0} \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} H_0 \\ B_0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $A^{-1}$  – обратный оператор линейного отображения  $A$ .

Запишем искомый оператор в виде матрицы:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

тогда легко определить ее элементы на основании метода наименьших квадратов, который используется в регрессионном анализе.

В рамках пассивного подхода регрессионного анализа [5] будем иметь:

$$\begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{pmatrix} = (\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{X}_h; \quad \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{pmatrix} = (\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{X}_b, \quad (5)$$

где  $\mathbf{X}_h$  и  $\mathbf{X}_b$  – векторы-столбцы откликов для значений  $h$  и  $b$  соответственно;  $\mathbf{U}$  – матрица наблюдений компонент энергетического баланса:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} p_{n1} & p_{u1} \\ \dots & \dots \\ p_{nj} & p_{uj} \\ \dots & \dots \\ p_{nr} & p_{ur} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{X}_h = \begin{pmatrix} h_1 \\ \dots \\ h_j \\ \dots \\ h_r \end{pmatrix}; \quad \mathbf{X}_b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_j \\ \dots \\ b_r \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$j = 1, 2, \dots, r$  – моменты наблюдений переменных состояния процесса, число которых на практике для сглаживания шума измерений  $r \gg 3$ .

Пассивный подход требует большого числа наблюдений компонент мощности и соответствующих им значений параметров формы. Это предполагает значительные измерительные и вычислительные трудности обработки большого массива данных. Кроме того, он не дает независимых оценок элементов матрицы  $A$ .

В этом случае предпочтителен активный подход регрессионного анализа. Но его применение невозможно, так как мы не можем назначать волевым путем элементы пространства регистрируемых компонент энергетического баланса и тем более пространства параметров сварного шва, что необходимо для осуществления плана эксперимента.

**Методика идентификации.** Введем в рассмотрение третье множество – линейное метрическое пространство параметров режима  $R$ , элементами которого будут пары основных параметров режима: тока пучка и тока фокусирующей линзы  $(I_p; I_\phi)$ . Элементы данного пространства мы можем произвольно задавать при проведении сварки, назначая необходимую мощность и плотность мощности в пятне нагрева. С введением в рассмотрение пространства  $R$  можно ввести еще два отображения:  $f$  и  $g$  (рис. 2), устанавливающих взаим-

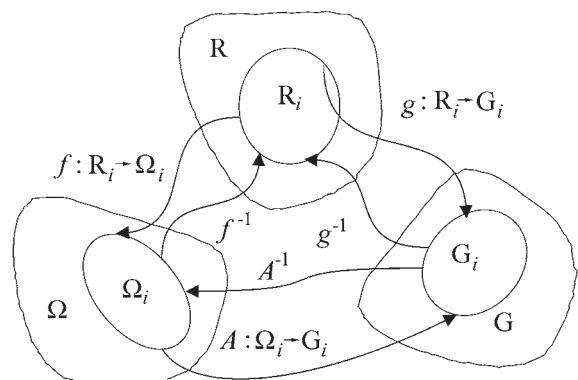


Рис. 2. Геометрическая интерпретация отображений рассматриваемых пространств:

$\Omega$  – пространство компонент энергетического баланса пучка;  $R$  – пространство параметров режима сварки;  $G$  – пространство геометрических параметров проплава шва;  $\Omega_i$ ,  $R_i$ ,  $G_i$  – локальные области соответствующих пространств;  $A$ ,  $f$ ,  $g$  – отображения (линейные операторы)

но-однозначное соответствие между некоторой областью введенного пространства  $R_i \subset R$  и областями  $\Omega_i$  и  $G_i$  ранее введенных пространств [6].

Тогда по аналогии с выражением (2) для данных отображений можем записать

$$\begin{pmatrix} h \\ b \end{pmatrix} = g \begin{pmatrix} i_{\pi} \\ i_{\phi} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} p_{\pi} \\ p_{\phi} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} i_{\pi} \\ i_{\phi} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $i_{\pi}$  и  $i_{\phi}$  отсчитаны в  $R_i$  от начала координат в точке  $(I_{\pi 0}; I_{\phi 0})$ , которая с помощью обратных операторов  $g$  и  $f$  отображается в начало координат пространства геометрических параметров формы проплава и компонент энергетического баланса.

Тогда искомое отображение  $A$  можно представить композицией отображений  $g$  и  $f^{-1}$ . Действительно, из соотношений (7) следует

$$\begin{pmatrix} h \\ b \end{pmatrix} = g \cdot f^{-1} \begin{pmatrix} p_{\pi} \\ p_{\phi} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Сравнивая (2) и (8), можно записать равенство отображений

$$A = g \cdot f^{-1}. \quad (9)$$

Полученный результат хорошо интерпретируется (см. рис. 2): отображение  $A$  эквивалентно последовательности отображений  $\Omega_i \rightarrow R_i \rightarrow G_i$ . Представим  $f$  и  $g$  аналогично  $A$  в виде квадратных матриц

$$f = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{21} \\ f_{12} & f_{22} \end{pmatrix}; g = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{21} \\ g_{12} & g_{22} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Тогда на основании матричного соотношения (9) можно получить выражение для элементов матрицы  $A$ , которые являются коэффициентами системы линейных алгебраических уравнений (2) при условии (4). Исходя из выражения для нахождения обратной матрицы

$$f^{-1} = \frac{\tilde{F}}{\det f}, \quad (11)$$

где  $\tilde{F}$  – присоединенная матрица, полученная транспонированием исходной матрицы, в которой элементы  $f_{ij}$  заменены их алгебраическими дополнениями;  $\det f$  – детерминант матрицы  $f$ .

На основании выражений (9)–(11) окончательно получим вид искомого отображения в виде квадратной матрицы, выраженной через элементы матриц  $f$  и  $g$ :

$$A = \frac{1}{f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21}} \begin{pmatrix} g_{11}f_{22} - g_{12}f_{21} & g_{12}f_{11} - g_{11}f_{12} \\ g_{21}f_{22} - g_{22}f_{21} & g_{22}f_{11} - g_{21}f_{12} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Таким образом, для нахождения искомой матрицы для уравнения (2) необходимо знать элементы матриц линейных операторов, отображающих пространство параметров режима  $R$  в два других: соответственно  $\Omega$  и  $G$ . Но эти отображения легко найти в рамках активного подхода, например методом планирования эксперимента.

**Практическая реализация методики.** Рассмотрим использование предлагаемого подхода на примере нахождения зависимости параметров проплава от энергетического баланса для электронно-лучевой сварки стали 12Х18Н10Т на установке с источником ускоряющего напряжения  $U_y = 30$  кВ и электронной пушкой типа СПИН-3М, с ленточным катодом из tantalа толщиной 0,1 мм.

Зададим локальную область пространства геометрических параметров сварного шва  $G_i$ , определив следующие интервалы изменения каждого параметра проплава, мм:  $6 \leq H \leq 17$  и  $5 \leq B \leq 7$ . Из технологических соображений по заданной области  $G_i$  выбираем соответствующую ей область  $R_i$  пространства параметров режима. Задаем ее следующими интервалами параметров режима:  $60 \leq I_{\pi} \leq 100$  (mA) и  $0,97I_{ext} \leq I_{\phi} \leq 0,99I_{ext}$ , где  $I_{ext}$  – экстремальное значение тока фокусировки, обеспечивающее максимальную глубину проплава шва при прочих равных условиях. То есть сварка ведется в области, прилежащей к острой фокусировке пучка.

Для выбранной локальной области планируем двухфакторный эксперимент [5] типа  $2^2$ , где безразмерные факторы тока пучка  $X_1$  и тока фокусировки  $X_2$  варьируются на отрезке  $[-1; +1]$ , соответственно заданным граничным значениям интервалов и центра области.

В качестве откликов выступают координаты точек пространств  $\Omega_i$  и  $G_i$ , т.е.  $P_{\pi}$ ,  $P_{\phi}$  и  $H$ ,  $B$  (таблица). Значения параметров шва определены на основании металлографического исследования как среднее по четырем

#### План эксперимента и полученные результаты

$X_0$	$X_1(I_{\pi})$	$X_2(I_{\phi})$	$P_{\pi}$ , кВт	$P_{\phi}$ , кВт	$H$ , мм	$B$ , мм	$H_p$ , мм	$B_p$ , мм
+	+	-	2,02	0,98	13,0	6,8	12,92	6,88
+	-	-	1,08	0,72	6,8	5,9	6,88	5,82
+	+	+	2,29	0,71	16,3	6,2	16,38	6,12
+	-	+	1,2	0,60	8,5	5,4	8,42	5,48

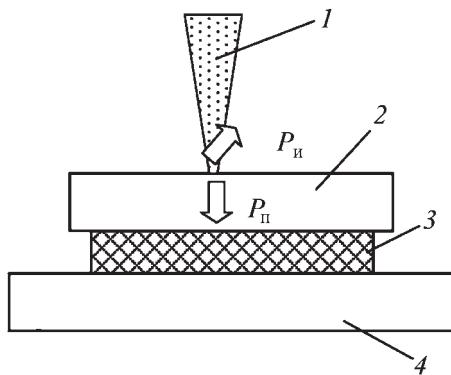


Рис. 3. Схема сварки экспериментальных образцов:  
1 – пучок; 2 – образец; 3 – теплоизолят; 4 – стол

шлифам. Поглощенную мощность определяли по приращению  $\Delta T$  температуры образца по формуле

$$P_{\text{п}} = C \frac{\Delta T m}{t_{\text{св}}}, \quad (13)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость;  $t_{\text{св}}$  – время сварки шва;  $m$  – масса образца. За температуру нагрева образца принимали установившееся значение температуры, которую измеряли в двух отстоящих точках образца с помощью термопар и измерительного прибора КСП-4. Сварку образцов проводили на подкладке из теплоизолирующего материала (рис. 3).

Мощность, излучаемую во внешнее пространство, определяли как разность полной мощности пучка и поглощенной компоненты  $P_{\text{п}}$ :

$$P_{\text{и}} = I_{\text{п}} U_y - P_{\text{п}}. \quad (14)$$

В таблице приведены полученные значения откликов компонент для следующих значений величин:  $C = 477 \text{ Дж/(кг·К)}$ ;  $t_{\text{св}} = 75 \text{ с}$ ;  $m = 1,97 \text{ кг}$ ;  $U_y = 30 \text{ кВ}$ . Сварку проводили на скорости 2 мм/с.

Пользуясь формулами для подсчета коэффициентов регрессионных уравнений [5], по результатам двухфакторного эксперимента подсчитываем элементы матриц (10), составляющих композицию отображений (9), которые равны соответствующим коэффициентам уравнений регрессии (7). Постоянными членами уравнений регрессии являются координаты центров рассматриваемых областей. Таким образом, вычисления дают:

$$\begin{aligned} f &= \begin{pmatrix} 0,5075 & 0,925 \\ 0,975 & -0,975 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} P_{\text{п0}} \\ P_{\text{и0}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,6475 \\ 0,7525 \end{pmatrix}, \\ g &= \begin{pmatrix} 3,5 & 1,25 \\ 0,425 & -0,275 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} H_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11,25 \\ 6,075 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

По данным (15) согласно равенству (12) получаем матрицу отображения локальной области пространст-

ва компонент энергетического баланса в пространство геометрических параметров шва в виде (4)

$$A = \begin{pmatrix} 7,810 & -5,010 \\ 2,735 & 3,094 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Возвращаясь к исходному уравнению (2), можно представить искомую связь между параметрами в виде системы уравнений. С учетом ненулевых значений координат центров отображаемых областей из (15) будем иметь:

$$\begin{pmatrix} H \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_0 \\ B_0 \end{pmatrix} + A \begin{pmatrix} P_{\text{п}} - P_{\text{п0}} \\ P_{\text{и}} - P_{\text{и0}} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

окончательно получаем решение данной задачи в виде системы, связывающей геометрические параметры формы и компоненты мощности со своими размерностями:

$$\begin{aligned} H &= 2,054 + 7,81P_{\text{п}} - 5,01P_{\text{и}}; \\ B &= 3,296 + 2,73P_{\text{п}} + 3,094P_{\text{и}}. \end{aligned} \quad (18)$$

В двух последних столбцах таблицы приведены значения  $H_p$ ,  $B_p$  – оценки значений  $H$  и  $B$ , вычисленных по выражению (18). Имеем хорошее совпадение с экспериментальными значениями геометрических параметров проплава шва.

При создании системы контроля или при управлении процессом ЭЛС компоненты энергетического баланса в предложенной методике необходимо заменить их сигналами [7]. Таковыми являются, например, ток изделия, который пропорционален поглощаемой составляющей мощности и который измеряется с помощью шунта, включаемого между изделием и положительным полюсом источника ускоряющего напряжения. Сигналом излучаемой составляющей мощности является яркость парогазового факела над кратером, измерить которую можно чувствительным фотодатчиком, например фотоэлектронным умножителем.

### Заключение

В ходе проведения технологического процесса ЭЛС на электронный пучок – источник энергии – действуют неконтролируемые возмущения, искажающие его исходное распределение плотности мощности. Кроме того, в силу нагрева изделия при сварке возникает изменение его температуры в ходе формирования сварного шва. Это приводит к тому, что параметры формы проплава (глубина и ширина) подвержены нестационарному изменению как от изделия к изделию, так и в ходе сварки данного конкретного шва. Если обычно этими изменениями можно пренебречь, то при сварке изделий ответственного назначения подобное, как правило, недопустимо.

Основываясь на зависимости компонент энергетического баланса пучка в парогазовом кратере от параметров его формы и, соответственно, формы проплава сварного шва, можно предложить эксперименталь-

ный подход к параметрической идентификации уравнения, отражающего данную связь. Полученное уравнение, связывающее сигналы компонент энергетического баланса, которые нетрудно измерить в ходе процесса ЭЛС, и параметров формы проплава шва позволит создать систему для оценки текущей формы проплава.

Данное уравнение связи нельзя идентифицировать в активном эксперименте по причине невозможности задания требуемых значений упомянутых выше переменных этого уравнения. В связи с этим можно предложить методику, сущность которой заключается в том, что искомое уравнение можно найти опосредованно, через соответствующие отображения – уравнения связи – а именно: параметров режима с компонентами энергетического баланса и с параметрами сварного шва. Данные отображения легко установить в рамках активного эксперимента, поскольку необходимые значения параметров режима мы можем произвольно назначать. Искомое соотношение определяется как композиция данных, найденных в активном эксперименте отображений для параметров режима.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ластовирия В.Н.** Идентификация связи формы проплава с энергетическим балансом пучка при электрон-

но-лучевой сварке // Машиностроение и инженерное образование. 2007. № 3. С. 17–22.

2. **Ластовирия В.Н.** Принципы управления формой проплава в технологическом процессе электронно-лучевой сварки // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3.

3. **Электронно-лучевая сварка /** О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др. Под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наук. думка. 1987. 256 с.

4. **Электронно-лучевая технология:** пер. с нем. / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. М.: Энергия. 1980. 528 с.

5. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., 1976. 279 с.

6. **Зорич В.А.** Математический анализ. Часть II. Изд. 2-е испр. и доп. М.: Изд-во МЦНМО, 1998. 794 с.

7. **Ластовирия В.Н.** Оценка текущей глубины проплава по регистрируемым переменным процесса проплавления при ЭЛС // Сварка и смежные технологии. Сб. докл. ВНТК. М.: Изд-во МЭИ, 2000. С. 388–392.

*Вячеслав Николаевич Ластовирия, д-р техн. наук,  
lvn3@mail.msiu.ru*



## КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК МЕТАЛЛИСТА

Под общ. ред. А.Е. Древалия, Е.А. Скороходова

960 с. ISBN: 5-217-03261-8

**Цена 1650 р.**

В справочнике использовано более 700 ГОСТов, действующих и утвержденных на 1 июля 2004 г.

Приведены сведения по расчету технологических размеров заготовок, основам взаимозаменяемости, методам и средствам контроля, материалам, металлорежущим станкам, токарной обработке, обработке отверстий осевым инструментом и другим видам обработки металлов резанием, электрофизическим и электрохимическим методам обработки, слесарным работам и сборке. Также изложены сведения по технологичности деталей, обеспечению качества и размерной стабильности заготовок, выбору режимов резания, повышению износостойкости резцов и обработке на станках с ЧПУ.

Четвертое издание (3-е изд. 1986 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами и технической документацией, дополнено сведениями по восстановлению режущих свойств инструментов, смазывающе-охлаждающим технологическим средствам и другими материалами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей промышленности, полезен преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:  
по почте: 107076, г. Москва, Строгинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru  
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

# КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО



УДК 621.98

В.А. Дёмин, Д.М. Матюшкин, Д.В. Ростовцев, Е.И. Семёнов  
(Московский государственный индустриальный университет)

## Экономичный процесс изготовления деталей типа шайба

*Рассмотрен процесс изготовления деталей типа шайба, заключающийся в растяжке предварительно вырубленной овальной заготовки с пробитым в ней узким овальным отверстием. Данный процесс позволит производить подобные детали из листа и ленты более экономично.*

*New process of producing of rings and washers is considered. Main feature is stretching of punched sheet blank with punched oval hole. Presented process will allow to produce such type of parts more economically.*

**Ключевые слова:** гибка на ребро; растяжка; вырубка; листовая штамповка; программный комплекс PAM-Stamp.

**Keywords:** edge bending; stretching; punching; sheet forming; PAM-Stamp software.

Листовая штамповка является широко распространенной разновидностью обработки металлов давлением. В качестве заготовки применяют листовой материал – полосу, лист, ленту, карточки. Листовой штамповкой изготавливают большую номенклатуру самых разнообразных деталей для машиностроения и автомобилестроения.

Наибольшее распространение холодная листовая штамповка получила в крупносерийном и массовом производстве. Холодная листовая штамповка является одним из наиболее прогрессивных методов производства, она имеет ряд преимуществ перед другими видами обработки металлов давлением в техническом и экономическом отношении.

Основным прогрессивным технологическим фактором дальнейшего развития холодной листовой штамповки является стремление получить штамповкой полностью законченную деталь, не требующую дальнейшей обработки и с минимальным отходом металла.

В номенклатуре деталей получаемых листовой штамповкой достаточно много изделий, которые можно отнести к деталям типа шайба. Причем основной проблемой при штамповке таких деталей является очень низкий коэффициент использования материала (КИМ), который, как правило, не превышает 0,4, а иногда бывает меньше 0,1. Поэтому выполнено большое количество работ, посвященных увеличению КИМ при штамповке деталей типа шайба. Особенно это актуально в связи с резким подорожанием металла.

Многие исследователи предлагают штамповать шайбы из трубной заготовки. Однако данный технологический процесс не нашел широкого применения из-за высокой стоимости трубной заготовки, низкой

стойкости штампов для резки трубы, а также низкой точности и стабильности перехода штамповки, когда кольцо переходит в шайбу.

В данной статье рассмотрен один из экономичных технологических процессов получения деталей типа шайба из овальной заготовки.

Сущность процесса состоит в том, что растягивают предварительно вырубленную овальную заготовку с пробитым в ней узким овальным отверстием, получая при этом шайбу (рис. 1). При этом внутренняя по-

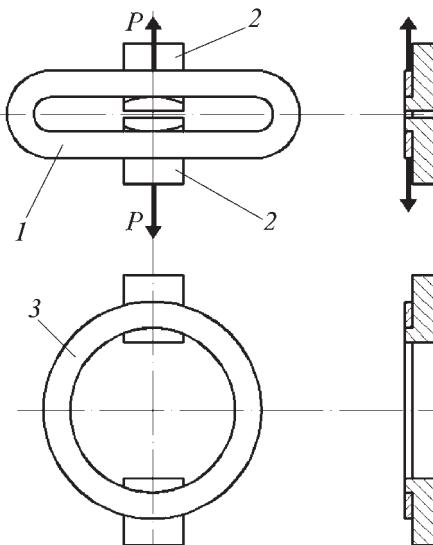


Рис. 1. Схема нового процесса изготовления детали типа шайба:

1 – заготовка; 2 – растягивающие ползуны; 3 – готовая деталь

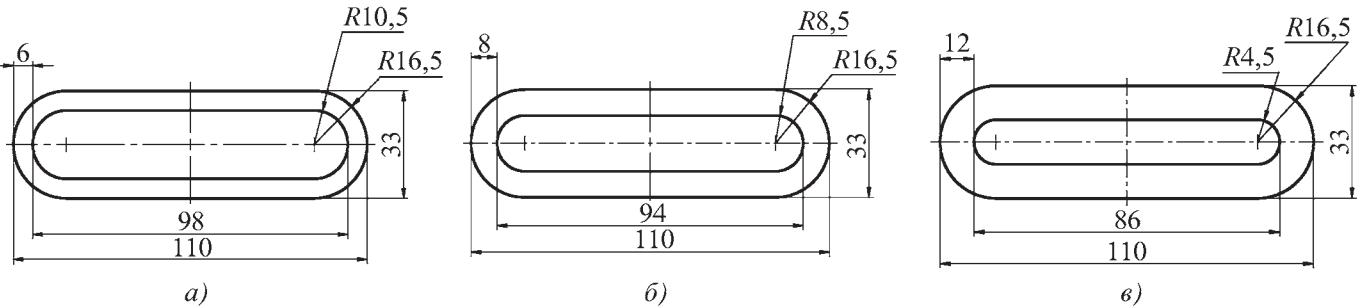


Рис. 2. Эскизы заготовок шириной 6 (а), 8 (б), 12 мм (в) и толщиной 3 мм

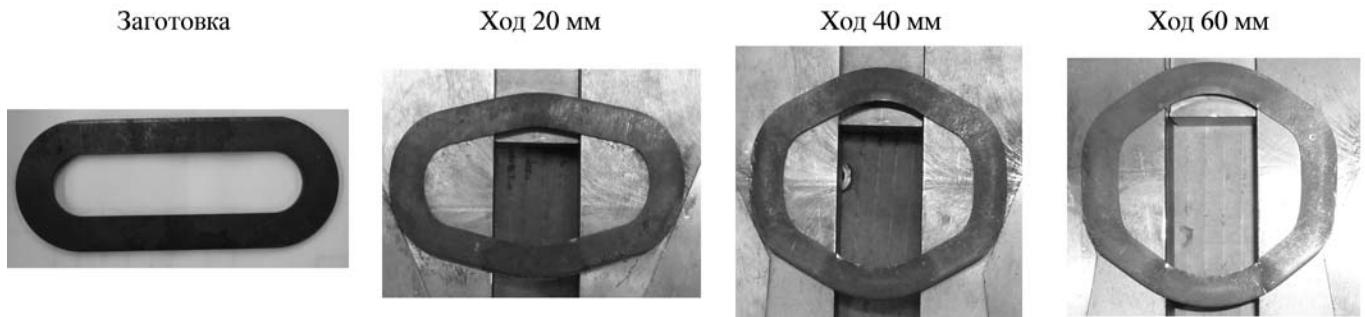


Рис. 3. Формоизменение при экспериментальной растяжке заготовки шириной 12 мм

лость шайбы резко увеличивается и автоматически получается внутреннее отверстие. Материал на получение этого отверстия не расходуется. Таким образом можно получить внутреннее отверстие не только круглой формы, но и квадратной или другой формы. Все будет зависеть от движения при растягивании заготовки и ограничителей этого движения, а также последовательности движений при растяжении заготовки в разных направлениях.

Заготовку 1 устанавливают так, чтобы в отверстие вошли растягивающие ползуны 2. Затем ползунь 2 приводятся в движение силами  $P$ . Один из ползунов 2 был неподвижен, а другой ползун 2 имел привод и двигался по стрелке. При этом силы  $P$  сверху и снизу равны. Штамп сделан в вертикальном исполнении, но существует вариант и горизонтального исполнения. После растяжения получают деталь 3.

Фактическая деформация — гибка на ребро. Поэтому при экспериментах были сделаны ограничительные плоскости в виде плит вдоль торцевых поверхностей заготовки. Это позволило избежать потери устойчивости заготовки в поперечном направлении.

В экспериментах использовали листовой металл марки Ст3, обладающий сравнительно низкой штампуемостью.

Эксперименты проводили на универсальной испытательной машине УИМ-100 в лаборатории МГИУ.

На рис. 2 приведены предварительно вырубленные из листа заготовки шириной 6, 8 и 12 мм и толщиной 3 мм.

Упрощенная теоретическая модель процесса растяжения заготовки — гибка на ребро. Применили три соотношения ширины заготовки к толщине листа 6/3, 8/3 и 12/3.

Во всех случаях было произведено растяжение этих заготовок с получением полой шайбы с формой, близкой к шестиугранной. При соответствующем изменении конструкции штампа были получены и шайбы с формой окружности.

На рис. 3 показаны фотографии формоизменения заготовки с отношением 12/3, т.е. наиболее сложный случай.

Также проведено компьютерное моделирование данного процесса в программном комплексе PAM-Stamp. На рис. 4 представлены результаты моделирования, показавшие утонение заготовки в процессе растяжки. Выявленна полная идентичность формоизменения на всех этапах процесса при экспериментальном и компьютерном исследовании формоизменения (см. рис. 3 и 4).

Установлено, что наибольшее утонение заготовок происходит на наружных частях заготовки в местах установки ползунов. Для заготовки шириной 6 мм минимальная толщина составила 2,94 мм, 8 мм — 2,6 мм, 12 мм — 2,36 мм.

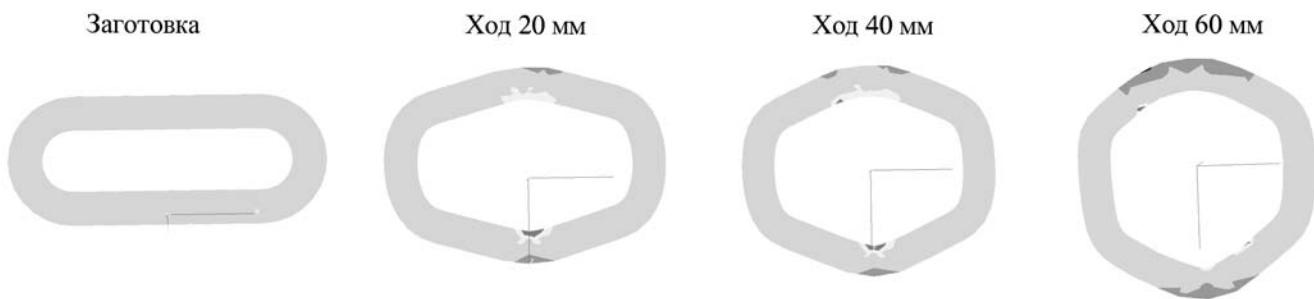


Рис. 4. Компьютерное моделирование растяжки заготовки шириной 12 мм

## Выводы

1. Рассмотренный процесс изготовления деталей типа шайба отвечает основным показателям технологичности листовых холодноштампованных деталей, а именно, обеспечивает наименьший расход материала (более чем в 2 раза по сравнению с классическими методами) и предлагает наименьшую себестоимость штампемых деталей.

2. Положительные результаты эксперимента со сталью Ст3, обладающей относительно низкой штам-

пуюемостью, доказывают применимость разработанного процесса для материалов с более высокой штампуюемостью, например для стали 08kp и др.

*Виктор Алексеевич Дёмин, д-р техн. наук,  
demin@msiu.ru;*  
*Дмитрий Михайлович Матюшкин, инженер;*  
*Денис Владимирович Ростовцев, аспирант;*  
*Евгений Иванович Семёнов, д-р техн. наук*

УДК 621.9.048.4

И.О. Аверьянова (Московский государственный индустриальный университет)

# Технологии изготовления штампов и пресс-форм с использованием электроэрозионного оборудования

Приведены информация о применении в машиностроении технологий обработки штампов и пресс-форм с использованием концентрированных потоков энергии, в частности, метода, основанного на эффекте электроэрозионной обработки, а также некоторые примеры маршрутной технологии обработки штампов.

The article deals with application of new technologies of stamp and mould machining in machine building using concentrated energy flows, particularly, method based on electroerosion machining. The article also includes some examples of sequences of technological stages in machining stamps.

**Ключевые слова:** концентрированные потоки энергии; штамп; пресс-форма.

**Keywords:** concentrated energy flows; stamp; mould.

Во всех ведущих отраслях машиностроения все в больших масштабах применяют высокоэнергетические и комбинированные методы обработки материалов, которые по разным источникам относят к методам, использующим концентрированные потоки энергии [1, 2]. Концентрированные потоки энергии являются универсальным технологическим инструментом для обработки труднообрабатываемых деталей машиностроения.

Воздействием таких потоков можно выполнять различные технологические операции без механиче-

ского силового действия инструмента на заготовку и без непосредственного контакта между инструментом и заготовкой, исключительно в результате использования специфических для каждого вида подобных воздействий физических и химических явлений [3, 4].

Параметры и сама возможность выполнения таких операций процесса определяются физико-химическими свойствами обрабатываемых деталей, такими как: тепло- и электропроводимость, теплота плавления и теплота испарения, химический состав и структура обрабатываемого материала и др. [2].

Большое влияние на протекание этих операций оказывает среда, в которой они выполняются. Эта среда бывает весьма разнообразной и может представлять собой вакуум или воздух при обычном атмосферном давлении, атмосферу из инертных или химически активных газов, диэлектрические или проводящие жидкости (электролиты) и др. [2].

Потоки концентрированной энергии могут иметь различную физическую природу: электронные пучки, световое излучение, потоки плазмы, электрические искровые и дуговые разряды в жидких и газообразных средах, дуговые разряды в электролитах и т.п. На практике все эти разновидности классифицируются по группам на электрофизические, электрохимические и комбинированные методы обработки материалов [2, 3].

К первой группе относятся *электрофизические методы*, использующие высококонцентрированные источники мощности электрического разряда. При концентрации плотности мощности, достигающей  $10^5\ldots10^8 \text{ Вт}/\text{см}^2$  на локальном участке поверхности, энергия электрического тока преобразуется в зоне обработки в тепловую, определяющую объем и удаление припуска "стружки" в жидком или парообразном состоянии. При этом высокая концентрация достигается благодаря локализации выделяющейся энергии в пространстве и времени при подводе энергии через канал разряда, луч лазера, поток плазмы, электронный луч и т.п.

Вторая группа – *электрохимические методы* основаны на одновременном преобразовании по всей обрабатываемой поверхности электрической энергии в химическую энергию; при этом анодное растворение или катодное осаждение происходит при значительно меньшей мощности источника энергии (примерно  $10\ldots10^4 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ), подводимой от источника энергии.

Третью группу составляют *комбинированные методы* обработки, в которых сочетается одновременное или последовательное использование методов первой и второй групп, эффективно дополняющих друг друга собственными энергетическими воздействиями.

Возросший интерес к методам обработки материалов концентрированными потоками энергии определяется значительным ростом применения труднообрабатываемых материалов – особо прочных, вязких, жаропрочных, коррозионно-стойких, магнитных, высокомарганцовистых и других сталей, сплавов с особыми свойствами.

Увеличение выпуска разнообразных видов машин и стремление получить заготовки с минимальными припусками на последующую обработку предопределили необходимость использования в производстве большого числа штампов, пресс-форм, литейных форм и другой технологической оснастки с применением металлокерамических твердых сплавов.

Создание малогабаритных приборов и аппаратов потребовало изготовления высокоточных, миниатюрных, нежестких деталей сложной конфигурации, тонкостенных конструкций, деталей с глубокими пазами и труднодоступными для обработки внутренними формами, которые практически невозможно получить механической обработкой.

В результате выполнения технологических операций с помощью воздействия концентрированных потоков энергий возможно обрабатывать особо твердые материалы металлического и неметаллического типа, а также хрупкие материалы. Существует также возможность выполнять принципиально новые операции, такие как создание трафаретов, напыление и наплавка многослойных покрытий, изготовление изделия со сложной формой с отображением (копированием) соответствующей формы фасонного электроуда-инструмента в теле заготовки. Важным следствием свойства отображения инструментом заданной формы на заготовке является возможность изготовления любых полостей с использованием во время работы только одной координаты перемещения инструмента (координатно-прошивочное оборудование).

Результатом применения указанных методов обработки является высокая концентрация выполнения технологических операций на одном станке, например, осуществление операций, подобных фрезерованию, сверлению, разрезке, а при наличии соответствующей оснастки – абразивной и упрочняющей обкатке (шлифования, раскатывания и т.п.).

Получение готовой детали из термически обработанной заготовки без промежуточных термообработок, достижение необходимой точности размеров без доводочных операций, отсутствие искажения размеров детали из-за отсутствия силовых воздействий инструмента на заготовку (бесконтактный метод обработки), отсутствие стружки, использование для изготовления детали одного станка с одним инструментом, возможность обслуживания одним оператором нескольких станков одновременно (автономная работа оборудования) – все это обусловило применение комплекса новых методов обработки, который изменяет традиционные представления о построении технологических процессов производства штамповочной и литьевой оснастки.

Перечисленные основные свойства технологии обработки деталей определяют эффективную область применения методов обработки концентрированными потоками энергии (в частности электроэррозионную обработку), в первую очередь в области наиболее распространенного в промышленности единичного и мелкосерийного производства, т.е. там, где традиционные методы обработки малоэффективны. Речь идет главным образом о производстве фасонной технологической оснастки (ковочных и вырубных, гибочных и т.п. штампов, пресс-форм всех типов), в том числе для прессования изделий из пластмасс, резины, порошков и других материалов.

На рис. 1 показана модель вырубного штампа клеммника, процесс изготовления которого анализируется с точки зрения его изготовления двумя методами – традиционным методом (механообработка) и электроэррозионной обработкой.

В табл. 1 приведены операции при механообработке и электроэррозионной обработке для изготовления матрицы и пuhanсона.

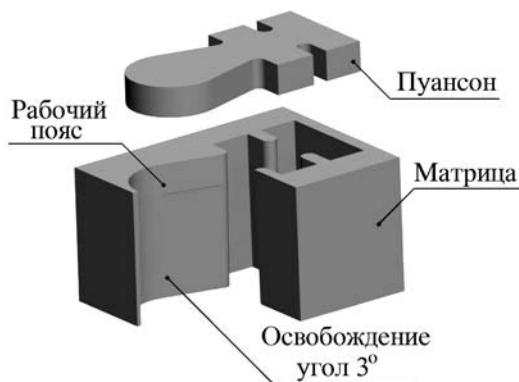


Рис. 1. Модель вырубного штампа клеммника

Как следует из вышеизложенного анализа, основное преимущество эрозионной обработки перед механической обработкой при изготовлении деталей сложной формы для штампа выражается в меньшем количестве используемого технологического оборудования. Также сокращается занимаемая площадь под оборудование и количество обслуживающего персонала. Кроме того, отсутствуют промежуточные операции по термической обработке заготовок. Производительность электроэрэозионной обработки по сравнению с механической нельзя сравнивать только по изготовлению числа изделий в единицу времени, а необходимо рассчитывать ее по совокупности многих показателей, как это делают многие иностранные фирмы, например, фирма Sodic (Япония). Системы управления эрозионными станками удобны и просты, что позволяет встраивать станки в автоматические линии и создавать участки, работающие по "безлюдной" технологии.

Области применения различного вида электроэрэозионной обработки достаточно разнообразны, некоторые из которых приведены в табл. 2.

На рис. 2 приведены схемы нескольких видов электроэрэозионной технологии изготовления разделительных штампов, разработанных в ЭНИМС (Экспериментальный научно-исследовательский институт металорежущих станков) [5].

### 1. Операции при изготовлении матрицы и пуансона механообработкой и электроэрэозионной обработкой

Наименование операции при механообработке		электроэрэозионной обработке
Изготовление матрицы		
1. Изготовление заготовки	1. Изготовление заготовки	
2. Установка и базирование на фрезерном станке	2. Установка на электроэрэозионном станке	
3. Фрезерование	3. 4-координатная электроэрэозионная резка	
4. Слесарная обработка		
5. Термообработка		
6. Установка и базирование на шлифовальном станке		
7. Слесарная обработка		
8. Доводочные операции		
Изготовление пуансона		
Разработка нового техпроцесса	Внесение коррекции в готовую программу	

При м е ч а н и е . При изготовлении матрицы при механообработке применяют специальный инструмент для каждого контура, а при электроэрэозионной обработке – инструмент-проводку для профиля любой сложности.

При обработке штампов по первой технологии все сопрягаемые детали обрабатываются на электроэрэозионных вырезных станках с ЧПУ. Сопряжения обрабатываемых поверхностей получают путем эквидистантной корректировки траекторий движения электрода-проводки, задаваемого управляющей программой, которая может изменяться на стадии ее подготовки или непосредственно в устройстве ЧПУ путем ввода корректоров. Для некоторых разделительных штампов возможно получение необходимых зазоров между сопрягаемыми деталями за счет ширины прорезаемого при вырезке паза путем подбора соответствующего диаметра электрода-проводки и электрических режимов.

### 2. Области применения электроэрэозионной обработки

Область применения	Эффективность по сравнению с традиционной механической обработкой	Типы станков
Обработка фасонных трехмерных поверхностей формообразующих деталей штампов, пресс-форм, литейных форм	Снижение трудоемкости в 1,5–3 раза. Сокращение в 2–4 раза цикла обработки. Сокращение или исключение ручного труда. Создание основы для специализированного централизованного производства	ЭКПС 300×200×1200×800 мм
Область матриц для экструдирования	Уменьшение трудоемкости до 2–3 раз, сокращение расхода инструментов	ЭВС XY 300×200×400×250 мм
Обработка рабочих деталей стальных разделительных и гибочных штампов	Снижение трудоемкости изготовления в 1,5–3 раза. Снижение до 3–4 раз затрат ручного труда при доводке формообразующих деталей. Сокращение в 3–4 раза цикла обработки. Создание основ для специализированного централизованного производства	ЭВС X, Y 200×120×700×400 мм ЭКПС 300×200×800×600 мм

Область применения	Эффективность по сравнению с традиционной механической обработкой	Типы станков
Обработка рабочих деталей твердосплавных разделительных штампов	Операции, не выполняемые механическими методами. Повышение точности до 2 раз	ЭОШС ЭВС X, Y ЭКПС 300×200×800×600 мм
Обработка твердосплавных высадочного инструмента и фильтер	Повышение производительности в 10–15 раз	ЭКПС 300×200 мм
Обработка трехмерных поверхностей вытяжных штампов	Сокращение на 70...80 % объема слесарных работ, уменьшение трудоемкости на 25...30 %	ЭКПС 600×400×1200×800 мм

О б о з н а ч е н и я: ЭКПС – электроэррозионный копировально-прошивочный станок; ЭВС – электроэррозионный вырезной станок с вырезкой по координатам X, Y; ЭОШС – эрозионно-оксидный шлифовальный станок.

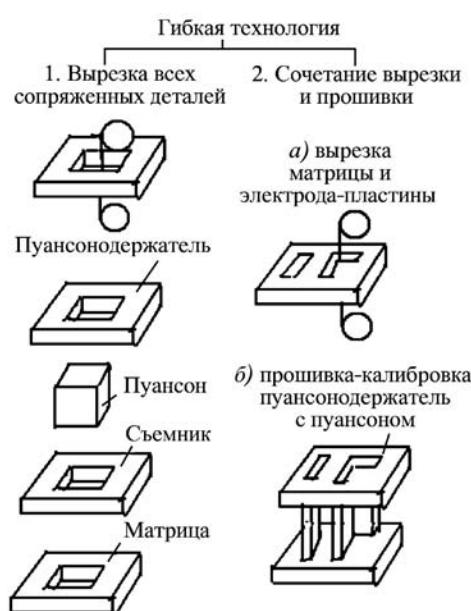


Рис. 2. Схемы технологии электроэррозионной обработки разделительных штампов

Работа по второй схеме предполагает использование сочетания электроэррозионной вырезки и копировально-прошивочных станков. На вырезных станках вырезаются отверстия в матрицах, пuhanсонодержателях и в пластинчатых мастер-электродах из электроэррозионно-стойкого материала, например, меди, медно-вольфрамовых композитов и т.п. Этими мастер-электродами затем профилюются концы пuhanсонов.

Профилирование пuhanсонов электродом-пластиной дает возможность изготовить из монолитной заготовки "групповой" пuhanсон, содержащий не один, а множество рабочих элементов, взаимодействующих с противостоящим множеством рабочих окон в матрице. Благодаря повышенной жесткости такого пuhanсона стойкость штампа возрастает до 3 раз.

Третья схема заключается в том, что на концы пuhanсонов наклеивается или напаивается эрозионно-стойкий материал. Пuhanсоны шлифуют до заданных размеров и устанавливают в пuhanсонодержатель. Используя

этис пuhanсоны, а точнее те их части, которые выполнены из эрозионно-стойкого материала, обрабатывают рабочие отверстия в матрицах на эрозионных станках. Здесь сопряжение формообразующих поверхностей матрицы и пuhanсона с заданным рабочим зазором в штампе получают в результате установки электрического режима обработки, влияющего, как известно, на межэлектродный зазор при электроэррозионном процессе [6, 7].

По четвертой схеме рабочие окна в матрице обрабатываются самими пuhanсонами. Пuhanсоны должны быть электрически изолированы от корпуса пuhanсонодержателя.

Из рассмотренных схем технологии электроэррозионной обработки разделительных штампов первые две схемы обработки, обеспечивающие минимальные затраты на время перехода на обработку любой детали, относятся к понятию гибких производственных систем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аверьянова И.О. Обработка деталей концентрированными потоками энергии: учебно-методическое пособие. М.: МГИУ, 2005. 88 с.
2. Рогов В.А., Ушомирская Л.А., Чудаков А.Д. Основы высоких технологий: учеб. пособие. М.: Вузовская книга, 2001. 256 с.
3. Аверьянова И.О., Клепиков В.В. Технология машиностроения. Высокознергетические и комбинированные методы обработки: учеб. пособие. М.: ФОРУМ, 2008. 304 с.
4. Аверьянова И.О., Михайлов О.В. Особенности электрохимических методов обработки деталей машиностроения. Технология, экономика и организация производства технических систем: межвуз. сб. науч. тр. М.: МГИУ, 2007. 5 с.
5. Машиностроение. Энциклопедия. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. Т. IV – 7 / Б.И. Черпаков, О.И. Аверьянов, Г.А. Адоян и др. Под ред. Б.И. Черпакова. М.: Машиностроение, 1999. 363 с.
6. Генератор ШГР-80×2-88М для электроэррозионных копировально-прошивочных станков: техническая инструкция / Сост. А.Т. Кравец, А.И. Титов и др. М.: ЭНИМС, 1986. 47 с.
7. Генератор ШГИ-63-440М для электроэррозионных станков: техническая инструкция / Сост. А.Т. Кравец, А.И. Титов и др. М.: ЭНИМС, 1988. 40 с.

Инна Олеговна Аверьянова, канд. техн. наук,  
inn-av@yandex.ru

**А.В. Власов, В.Н. Субич, Н.А. Шестаков**  
*(Московский государственный индустриальный университет)*

## Моделирование механических свойств пористых и композитных материалов

*Предложена методика расчетного определения функций плотности пористых композитных материалов и зависимости напряжения текучести от текущей плотности для использования их в континуальной феноменологической модели. Приведенные в статье данные о результатах моделирования позволяют надеяться на то, что результаты моделирования могут быть с приемлемой точностью использованы для исключения экспериментальных исследований механических свойств пористых материалов.*

*The technique of functions settlement definition of porous composit materials density and dependence of pressure of fluidity on current density for their use in continuum to phenomenological model is offered. Data cited in clause about results of modelling allow to hope that results of modelling can be used with comprehensible accuracy for exception of experimental researches of porous materials mechanical properties.*

**Ключевые слова:** порошковая металлургия; композитные материалы; механические свойства; моделирование.

**Keywords:** powder metallurgy; composit materials; mechanical properties; modelling.

В кузнечно-штамповочном производстве установилась тенденция использования пористых материалов (порошковых, гранулированных и стружковых с частицами подходящего размера) в качестве исходного материала, альтернативного прокату. Процессы обработки металлов давлением (ОМД), по существу, стали основой метода порошковой металлургии, заключающегося в изготовлении деталей из металлических порошков и их смесей (композитов и псевдосплавов) без расплавления. Вариант метода порошковой металлургии, включающий в себя прессование заготовок (брикетов) из металлических порошков в закрытом контейнере и последующее спекание, как правило, не обеспечивает высокого уровня механических свойств изделий.

Существенное повышение свойств изделий из металлических порошков стало возможным после начала применения спеченных заготовок для процессов ОМД с развитым пластическим течением. Это связано с тем, что при ОМД появляется возможность создания и управления в широких пределах параметрами интенсификации процессов уплотнения, консолидации (заличиваемости дефектного строения, обусловленного наличием пор), ускорения межчастичного диффузионного массопереноса, процессов формирования мелкозернистой структуры вплоть до наноструктурированных состояний.

К основным параметрам развитого пластического течения, открывающим возможность формирования свойств изделий за счет перечисленных эффектов, относятся: степень деформации, схема напряженного состояния, температурно-скоростные условия дефор-

мации, вид траектории деформации. Наблюдение, управление и предсказание количественных значений указанных параметров осуществляются на основе решения соответствующих задач, очерченных рамками теории пластичности необратимо сжимаемой сплошной среды.

В связи с тем, что многие кинематические аспекты поведения порошковых тел не отличаются от обычных сплошных тел, общепризнаны континуальные представления о процессах пластического течения пористых материалов (ПМ) на основе феноменологического подхода к построению теории. Построение феноменологической теории предполагает использование и распространение на более общие случаи частных результатов соответствующим образом поставленных экспериментальных работ. Поэтому в результате проведения частных испытаний материалов должны быть найдены некоторые универсальные функции, отражающие по возможности наиболее полно характерные свойства данного материала. Для построения теории и в технологических расчетах процессов деформации заготовок из ПМ наряду с традиционным набором свойств, характерным для компактных (несжимаемых) материалов, необходимо исследование свойств, связанных с их необратимой сжимаемостью и повышением плотности.

Среди общепринятых методов испытаний механических свойств компактных материалов (растяжение, сжатие, кручение и др.) только при испытании на сжатие реализуется схема напряженного состояния с отрицательным средним напряжением, характерная для процессов деформации ПМ. Другие методы испыта-

ний неприменимы из-за низкой пластичности ПМ. Кроме испытания на одноосное сжатие применяют установки трехосного нагружения в камерах высокого давления. Такие установки уникальны, являются дорогостоящим оборудованием и в большинстве случаев не доступны для систематических исследовательских работ, а тем более в технологической практике. Ограничения в выборе методов испытаний, их трудоемкость и недостаточность информации для построения полноценной феноменологической теории течения пористых материалов делают актуальным разработку виртуальных методов определения физико-механических свойств ПМ.

Феноменологический подход в рамках континуальных представлений о пластическом течении ПМ развивается на основе введения так называемых "представительных элементов", т.е. минимальных областей, идентичных по свойствам самим порошковым телам. Размер этих элементов существенно меньше габаритных размеров пористого образца и значительно превышает размеры отдельных частиц (гранул) или пор. Хотя сами характеристики порошковой или пористой среды при такой постановке рассматриваются как непрерывные функции координат, их определение имеет смысл в объемах, не меньших объема представительного элемента, и их рассмотрение внутри указанного объема лишено смысла.

Для континуума, заполненного представительными элементами, обладающими свойством сжимаемости, вводится, как и для несжимаемых материалов, поверхность нагружения и ассоциированный с ней закон течения.

Наиболее часто применяемой для изотропных пористых сред является поверхность нагружения Р.Дж. Грина, модифициированную форму записи которой можно представить как [1]:

$$\alpha\sigma_i^2 + \beta\sigma^2 = \sigma_{sn}^2, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  – функции относительной плотности  $p = 1 - \frac{V_p}{V}$  и других характеристик материала и процесса деформирования (температуры и т.д.);  $V_p$  – объем пор в пористой заготовке;  $V$  – объем пористой заготовки;  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{sn}$  – соответственно напряжение текучести материала основы и пористого тела;  $\sigma_i = \sqrt{3J_2} = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$  – интенсивность напряжений;  $s_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\sigma = \sigma_{ii}/3$  – среднее напряжение (гидростатическое давление).

В соответствии с ассоциированным законом течения зависимости между деформациями и напряжениями при пластическом течении некомпактного материала определяются следующим образом [2]:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 3\lambda \left[ \alpha s_{ij} + \frac{2}{9}\beta\sigma\delta_{ij} \right]; \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii} = 2\lambda\beta\sigma; \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}_v\delta_{ij} = 3\lambda\alpha s_{ij}; \quad (4)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{\dot{\varepsilon}_i}{2\bar{\sigma}_i}, \quad (5)$$

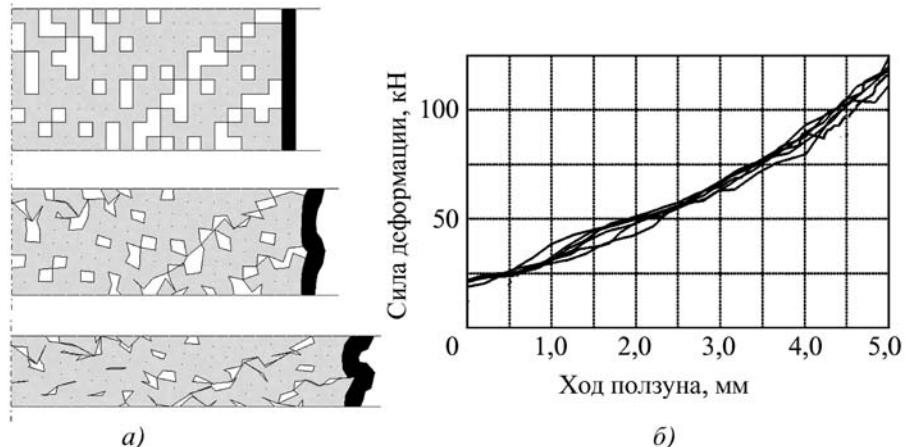
где  $\dot{\epsilon}_{ij}$  и  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – компоненты тензора и девиатора скоростей деформации;  $\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{\dot{\varepsilon}_i^2}{\alpha} + \frac{\dot{\varepsilon}_v^2}{\beta}}$  – интенсивность приведенных скоростей деформаций ПМ;  $\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}}$  – интенсивность скоростей деформаций;  $\dot{\epsilon}_v$  – скорость объемной деформации.

В настоящей работе предлагается численный подход к определению функций  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  на основе конечно-элементного (КЭ) моделирования пластической задачи деформирования представительного элемента при наличии в нем пор. При данном подходе рассматривается уплотнение в результате пластического деформирования частиц пористой среды и заполнения вследствие этого пор. Иные механизмы уплотнения (такие, как диффузия, спекание и др.) не учитываются, однако при холодном уплотнении они не должны играть существенной роли. Такой подход в чем-то аналогичен моделированию теплопроводности пористых материалов, рассмотренному в работе [3], только в отличие от указанной работы поры не рассматриваются как материал с некоторыми предельными свойствами, а в представительном объеме реально присутствуют пустоты, т.е. зоны, где материал отсутствует. Это позволяет избежать проблем с подбором таких свойств материала "пор", которые бы не оказывали значительного влияния на результаты расчета, однако при создании сетки необходимо позаботиться, чтобы область с материалом была односвязной, и не появлялось свободно "подвешенных" областей. Выполнение этого условия особенно проблематично при низких плотностях (порядка 0,5). Поэтому предлагаемый подход прежде всего целесообразно апробировать для спеченных заготовок, плотность которых, как правило, выше 70 %. Кроме этого, алгоритм расчета должен включать в себя реализацию условия непроникновения частиц (элементов) друг в друга при закрытии пор.

Формирование "пустот" осуществляется путем удаления из регулярной сетки элементов, выбранных с помощью генератора случайных чисел. Для выполнения условия изотропности представительного объема количество удаленных элементов из сетки КЭ (пор) в каждом горизонтальном и вертикальном рядах задается одинаковым в соответствии с заданной плотностью.

Пример результатов расчета осадки представительного элемента в виде цилиндра без трения на контактных поверхностях приведен на рис. 1. Наружный слой элементов сделан "сплошным" для упрощения подсчета объема тела и, соответственно, его относитель-

Рис. 1. Результаты моделирования уплотнения при испытании на осадку цилиндрических образцов с относительной плотностью 0,71 (более темным цветом показан наружный слой элементов):  
 а – формаизменение (показана половина сечения); б – зависимости силы деформации от хода ползуна



ной плотности  $p$ . При различном распределении пор внутри тела и одинаковой плотности результаты расчета несколько отличаются. На рис. 1, б приведены зависимости силы деформации от хода ползуна для шести вариантов случайного распределения пор при заданной плотности. При этом отклонение текущей расчетной силы от ее текущего среднего значения не превышает 10 %. Следует отметить, что в реальных материалах, используемых для исследования механических свойств, поры также распределены случайным образом. Поэтому при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных можно сравнивать только средние значения параметров и использовать их для оценки точности расчетных величин.

Для расчетов были заданы следующие исходные данные для представительного элемента: цилиндр диаметром 40 мм, высотой 10 мм, относительная плотность  $p = 0,71$ . Кривая упрочнения материала основы задана в виде степенной зависимости  $\sigma_s = 100e^{0,1}$  (МПа). В качестве результата расчета получен текущий объем представительного элемента и его размеры: высота и средний диаметр, а также текущая относительная плотность и зависимость силы деформации от хода ползуна.

При проведении физического эксперимента на натурных образцах эти данные получают путем их ступенчатой осадки с промежуточными измерениями текущей силы, размеров и плотности. Текущую плотность измеряют гидростатическим взвешиванием. На основании полученных экспериментальных данных функции  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  определяют следующим образом.

Приращение объемной деформации  $\Delta e_v$  связано с приращением относительной плотности  $p$  [2]:

$$\Delta e_v = -\frac{\Delta p}{p}. \quad (6)$$

Учитывая, что в данном случае

$$\Delta e_p = \Delta e_\theta; \Delta e_v = \Delta e_z + 2\Delta e_p = -\Delta p/p,$$

где  $\Delta e_p$ ,  $\Delta e_z$  – приращения радиальной и осевой пластической деформации, получаем:

$$\Delta e_p = -\frac{1}{2} \left( \Delta e_z + \frac{\Delta p}{p} \right), \quad (7)$$

где

$$\Delta e_z = \ln(h/h_0), \quad (8)$$

$h$ ,  $h_0$  – соответственно текущее и начальное значения высоты испытуемого образца на каждом этапе ступенчатого нагружения.

При этом выполняются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \sigma_\phi = 0; \sigma_z = -q; \\ \sigma &= -\frac{1}{3}q; s_p = s_\phi = \frac{1}{3}q; s_z = -\frac{2}{3}q, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $q$  – текущее расчетное давление.

Тогда коэффициент поперечной деформации определяется через экспериментально измеряемые величины так:

$$\mu_p = -\frac{\Delta e_p}{\Delta e_z} = \frac{1}{2p} \left( \frac{\Delta p}{\Delta e_z} + p \right). \quad (10)$$

Поскольку из (10) и (2) следует:

$$\mu_p = \frac{1}{2} \frac{(9\alpha - 2\beta)}{(9\alpha + \beta)}, \quad (11)$$

то, подставляя (9), (10), (11) в (1), (2) и (3), получаем выражения для искомых функций от плотности  $\alpha(p)$ ,  $\beta(p)$ ,  $\delta(p)$  через экспериментальные функции  $\mu_p = \mu_p(p)$  и  $q = q(p)$  в виде:

$$\begin{aligned} \alpha &= 2(\mu_p + 1)/3; \\ \beta &= 9 - 6(\mu_p + 1); \delta = \sigma_{s\text{ н}}^2 / \sigma_s^2; \sigma_{s\text{ н}} = q. \end{aligned} \quad (12)$$

В настоящей работе данные о текущей силе деформации, размерах представительного элемента и его плотности получены в результате виртуального моде-

лирования физического эксперимента и позволяют рассчитать функции плотности  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  для условия (1) по этой же методике. Отличие заключается лишь в том, что необходимые данные получены в результате виртуального эксперимента.

Напряжение текучести материала основы  $\sigma_s$  для натурного и виртуального экспериментов определяется испытанием на сжатие соответствующего компактного материала.

Приведенные на рис. 1, б данные позволяют надеяться, что после соответствующей экспериментальной проверки предлагаемого подхода, опираясь на осредненные результаты моделирования, можно с приемлемой точностью использовать для расчетного метода определения функций плотности пористых материалов, входящих в условие (1), и тем самым исключить трудоемкие экспериментальные исследования. Следует отметить, что в данных расчетах использовалась достаточно грубая сетка КЭ, это сделано исключительно в целях более наглядного представления методики. При моделировании представительный объем должен быть разбит на существенно большее число элементов.

В работах [2, 4] показано, что функции плотности существенно зависят от схемы напряженного состояния, в частности от коэффициента жесткости  $\eta = 3\sigma/\sigma_s$ . Эта зависимость также может быть определена с помощью предлагаемого в данной статье подхода. Такие однородные процессы, как осадка в круглом жестком контейнере представительных элементов в виде цилиндрических заготовок без трения, осадка длинных параллелепипедов в условиях плоской деформации без трения, сжатие с кручением при условии запрета проскальзывания на контактных поверхностях в окружном направлении, дают возможность получить аналитические зависимости (см., например, [5]) для анализа поведения пористой среды при различных напряженных состояниях при использовании условий (1). Аналогично рассмотренному случаю осадки на плоских плитах по результатам моделирования можно получить функции  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  при различных схемах напряженного состояния и тем самым установить их зависимость от параметра  $\eta$ .

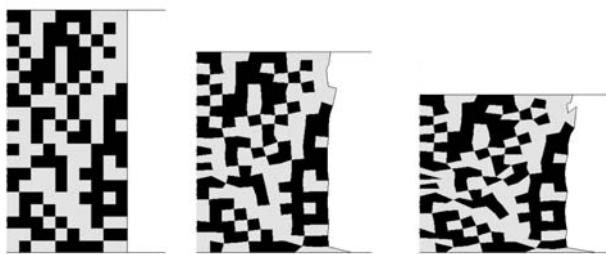


Рис. 2. Расчет формоизменения при осадке без трения цилиндрических образцов с равным соотношением компонент (светлым цветом показаны "частицы" более "мягкого" металла)

Рассмотренный подход к определению механических свойств на основе КЭ моделирования течения пористого материала может быть распространен на решение не менее актуальной задачи определения механических свойств композитных смесей порошковых материалов, поведение которых характеризуется свойствами сжимаемого континуума, заполненного представительными элементами. В этом случае ставится задача определения свойств композиции при условии, что известны свойства ее составляющих, распределенных по объему случайным образом. При этом встает вопрос не только о виде функций пористости, но и о приведенных (осредненных) характеристиках базового материала, который становится неоднородным. Речь, в частности, идет о напряжении текучести базового материала, представляющего собой смесь различных порошков. Конечная цель в этом случае состоит в построении континуальной модели однородного материала со свойствами, эквивалентными свойствам неоднородного материала, имеющего заданное строение.

Для определения "приведенных" характеристик композитов, которые впоследствии можно было бы применять при континуальном моделировании, также предлагается использовать деформирование представительного объема со случайным распределением заданного процентного соотношения различных компонентов внутри него. Пример результатов такого расчета приведен на рис. 2.

График силы деформирования и средняя площадь образца, вычисленная из условия несжимаемости, позволяют получать осредненные значения напряжений текучести при различных соотношениях компонент в композитных смесях.

В рамках предлагаемого подхода можно также осуществить численную проверку моделирования более сложных задач, например, уплотнения многокомпонентных порошковых смесей. Для этого нужно сравнить два численных результата. *Первый* – полученный при решении указанной задачи с использованием континуальных представлений на базе данных о функциях пористости и приведенных характеристиках многокомпонентной основы. *Второй* – это прямое решение задачи деформирования представительного объема при случайному распределении различных компонентов и пор.

На рис. 3 приведены результаты моделирования формоизменения такого представительного элемента, содержащего 40 % частиц меди (серые элементы), 40 % частиц вольфрама (темные элементы) и 20 % пор (белые элементы). Для расчетов были заданы следующие исходные данные для представительного элемента: цилиндр диаметром 20 мм, высотой 20 мм, относительная плотность  $p = 0,8$ . Кривая упрочнения меди задана в виде  $\sigma_s = 430e^{0,32}$  (МПа), а вольфрама в виде  $\sigma_s = 1100e^{0,2}$ . В качестве результата расчета получен текущий объем представительного элемента и его размеры: высота и средний диаметр, а также текущая

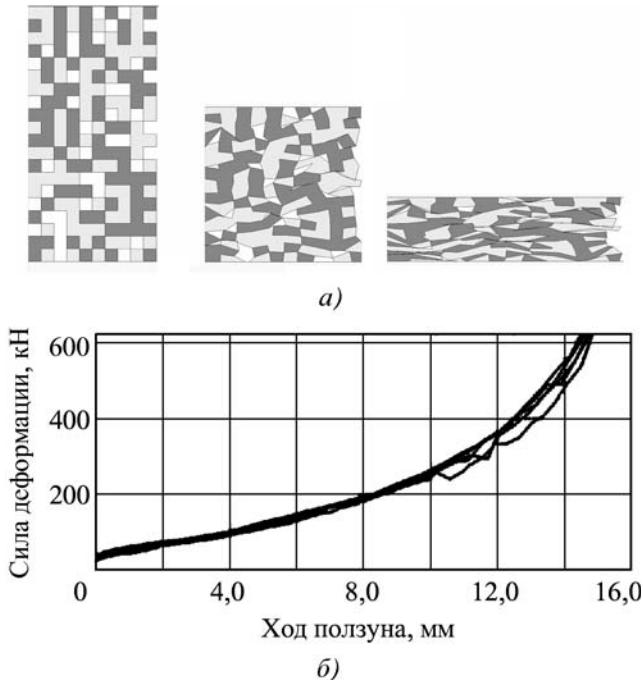


Рис. 3. Моделирование испытания на осадку цилиндрических композитных пористых представительных элементов:  
а – формоизменение; б – зависимости силы деформации от хода ползуна

относительная плотность и зависимости силы деформации от хода ползуна.

График зависимости силы деформации от хода ползуна, текущая средняя площадь представительного элемента и текущая плотность, полученные расчетным путем, позволяют получать осредненные значения напряжений текучести при различных соотношениях компонент в композитных смесях и зависимости функций  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  от плотности для условия (1). На рис. 3, б приведены зависимости силы деформации от хода ползуна, полученные при различных случайных

распределениях компонентов композита и пор. Как видно из приведенных графиков, указанная зависимость слабо зависит от их распределения.

Таким образом, предложена методика расчетного определения функций плотности пористых композитных материалов и зависимости напряжения текучести от текущей плотности для использования их в континуальной феноменологической модели. Методика требует широкой экспериментальной проверки. Результаты моделирования можно с приемлемой точностью использовать для расчетного метода определения функций плотности пористых материалов, входящих в условие (1), и тем самым исключить трудоемкие экспериментальные исследования механических свойств пористых материалов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kobayashi S., Oh S. I., Altan T. Metal forming and the finite element method. Oxford, 1989. 378 p.
2. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Дёмин В.А. Пластическая деформация пористых материалов. М.: МГИУ, 2008. 277 с.
3. Моделирование теплопроводности при штамповке деталей из пористых материалов / А.В. Власов, В.А. Дёмин, В.Н. Субич, Н.А. Шестаков // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 1. С. 28–30.
4. Ломакин Е.В. Пластическое течение дилатирующей среды в условиях плоской деформации // Известия АН РФ. МТТ. 2000. № 6. С. 58–68.
5. Власов А.В. К вопросу о моделировании процессов деформирования порошковых материалов / Исследования в области теории, технологии и оборудования обработки давлением: межвуз. сб. науч. трудов. Орел, Тула: ОрелГТУ, ТулГУ, 1998. С. 7–13.

Андрей Викторович Власов, д-р техн. наук;  
Вадим Николаевич Субич, д-р техн. наук;  
Николай Александрович Шестаков, д-р техн. наук,  
shes-v@mail.msiu.ru

Читайте в следующем номере журнала  
"Заготовительные производства в машиностроении"

- Ёóêüýí î â Â.Í ., î àòêàâà È.È., Áî éêî Â.À., Åëõî â Â.À., Äî öåí êî Ä.Â., Áåçéî ðî - âàéí î â À.Ã Ø òàì î âêà èõóõì èçí ã óóû õ î òâî äî â èç òðóáí û õ çàã òî âî ê òèòàí î âî ã ñî èàâà
- Èî ðó óí î âà Â.Â. Đàçâèòèå î åòî äèèè î ðî åêòèðî âàí èÿ î ðåöèçèí í í û õ çàã òî âî ê äëÿ õî ëî äí î â âàëüöääai èÿ ëî î àòî ê æçí òðóáèí í û õ äæëäåðäåé
- Í î òàì î â À.È., Èî æí î â Þ .Í ., Âè÷óæáí eí Ä.È. Åëèÿí èå î ëî òî ñòè í à ñî î ðî òèâëåí èå äåô î ðî à-òèè ãðá÷àòî ã òèòàí à
- Áî ãäàí î â Ý.Ô., ×åðêàñî âà È.Í . Åðàô èèè ñèëü äåô î ðî èðî âàí èÿ î ðè ø òàì î âêå í à êðèâî ø èi - í û õ ã ðý÷åø òàì î â ï û õ î ðåññàõ





УДК 621.774.35.016.3.06

А.А. Боровик (*ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ" им. академика А.И. Целикова"*)

## Новая система электропривода для стана холодной прокатки труб

*Рассмотрена система электропривода для современного стана холодной периодической прокатки труб производства ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ". Изложены основные задачи, поставленные при разработке нового поколения станов ХПТ. Дано краткое описание рабочей методики расчета мощности позиционных сервоприводов. Описана техническая реализация системы электропривода, приведены рабочие осциллограммы позиционного сервопривода.*

*Shape the system of the electric drive for modern cold pipe rolling mill manufactured on JSHK "VNIIMETMASH" is considered. The primal problems delivered by development of new generation of rolling mills cold pipe rolling are explained. The brief exposition of working design procedure of power of positional servodrives is given. Engineering realization of system of the electric drive is circumscribed, working oscillograms of positional servodrive are reduced.*

**Ключевые слова:** холодная периодическая прокатка труб (ХПТ); сервопривод; управляемый преобразователь частоты.

**Keywords:** process of periodic cold pipe rolling; servodrive; frequency converter.

На рынке трубной продукции особое место занимают трубы специального назначения (рис. 1). К ним относятся бесшовные трубы из металлов со специальными свойствами, с высокими требованиями к качеству внутренней и наружной поверхностей трубы и высокими допусками на овальность, в большинстве своем тонкостенные. Основными потребителями подобных труб являются предприятия авиационно-космической, атомной, химической, энергетической отраслей промышленности.

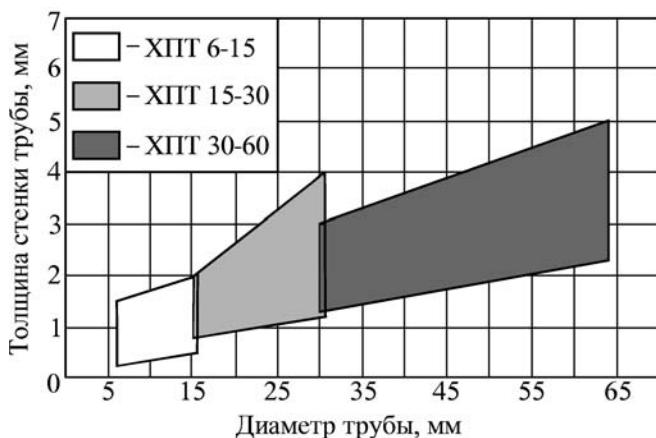


Рис. 1. Диапазон размеров готовых труб, получаемых на станах ХПТ

Одним из основных способов изготовления труб данного класса является прокатка на станах периодической холодной прокатки труб с клетями валкового (ХПТ) и роликового (ХПТР) типов.

Отечественный парк станов ХПТ и ХПТР составляет более 500 единиц. Большинство из них имеют устаревшую конструкцию и не удовлетворяют предъявляемым требованиям по производительности, качеству получаемых труб и экологическим нормам. В связи с этим встает вопрос об обновлении трубопрокатного парка российских заводов в целях увеличения производительности и улучшения качества прокатываемых труб.

Для замены устаревших прокатных станов необходимо прежде всего создать гамму новых станов, имеющих большую надежность, производительность и полную автоматизацию процесса прокатки.

Стан холодной периодической прокатки труб является оборудованием, работающим в ярко выраженном динамическом режиме. Особенность этого заметно в механизмах подачи и поворота трубы, которые в процессе прокатки должны прерывисто срабатывать в десятые доли секунды в крайних положениях рабочей клети, где валки освобождают прокатываемую трубу. По данным исследований эксплуатационной надежности станов холодной прокатки труб, подавляющее большинство отказов приходится на отказы, происходящие из-за выхода из строя деталей механизмов подачи и поворота трубы, обусловленных их износом и

усталостными поломками. Отказы деталей механизмов подачи и поворота составляют около 40 % от общего числа отказов всех механизмов стана ХПТ.

Таким образом, повышение надежности на новых станах может быть достигнуто отказом от группового электропривода механизмов подачи и поворота, громоздких редукторов и трансмиссионных валов, через которые производится раздача крутящего момента. Разделение механизмов подачи и поворота на отдельные механизмы и оснащение этих механизмов индивидуальными приводами позволит уменьшить число деталей, работающих в тяжелых динамических режимах.

Учитывая это, при создании станов ХПТ следующего поколения в ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ" в первую очередь было решено разработать новую систему подачи—поворота с применением сервоприводов для обеспечения прерывистого поворота винта подачи и вала поворота, что позволило бы свести к минимуму число деталей, работающих в динамическом режиме.

Применение сервоприводов существенно расширило технологические возможности стана: изменение и индикация величины подачи и поворота производятся непосредственно с пульта управления станом, а не регулировкой редуктора группового привода. При проходе стыка предыдущей и последующей прокатываемых труб в зоне деформации система управления позволяет, не останавливая стан, уменьшить величину подачи или скорость прокатки во избежание разрушения места стыка прокатываемых труб, а после прохождения стыка восстановить заданный режим прокатки.

Повышение производительности новых станов было достигнуто увеличением величины подачи и числа двойных ходов рабочей клети.

Все эти нововведения были реализованы в созданной в ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ" гамме станов холодной прокатки труб. Созданы три типоразмера станов ХПТ: ХПТ 6-15, ХПТ 15-45 и ХПТ 30-60. В этих станах были реализованы разделенные сервоприводы подачи—поворота с возможностью регулирования величины подачи с шагом 0,1 мм и угла поворота с шагом 1° и точностью 0,01 %. Изменение величины по-



Рис. 2. Пульт управления стана ХПТ

дачи и угла поворота производится с панели оператора, расположенной на пульте управления (рис. 2). Около 10 таких станов были поставлены ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ" в Японию, Южную Корею и Китай.

Однако в работе этих станов необходимо было делать перерыв на "перезарядку" при заправке новой трубы, что несколько снижало их производительность.

В 2007 г. ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ" начало разработку стана нового поколения ХПТ 6-20.

#### Технические характеристики стана ХПТ 6-20

Размеры заготовки, мм:

диаметр наружный .....	10...26
толщина стенки .....	1...3
длина .....	2000...6000

Размер готовой трубы, мм:

диаметр наружный .....	6...20
толщина стенки .....	0,25...1,5

Наибольшая деформация поперечного сечения за проход, %:

для углеродистых сталей.....	88
для легированных сталей и сплавов .....	70
для титановых, циркониевых сплавов .....	60
Диаметр вала (калибра), мм .....	180
Длина хода клети, мм.....	450
Число двойных ходов клети в минуту .....	До 140

Подача трубы за один двойной ход

клети, мм (в скобках указаны величины подачи в

двух крайних положениях рабочей клети) .....

До 10 (5+5)

Угол поворота трубы, ° .....

До 90

Максимальная производительность

(в зависимости от типа стали), м/ч .....

180

Мощность электродвигателя главного привода

переменного тока, кВт.....

22

Мощность сервомотора механизма подачи, кВт.....

4,4×2

Мощность сервомотора механизма поворота, кВт ..

4,4+3×1,3

Суммарная установленная мощность

электродвигателей переменного тока, кВт.....

45

Производительность насосной станции, м<sup>3</sup>/ч.....

1,6

Давление смазочно-охлаждающей

жидкости, МПа .....

0,3

Габаритные размеры, м:

длина .....

47

ширина .....

1,3

высота .....

1,5

В отличие от станов предыдущего поколения стан ХПТ 6-20 может работать без остановки на "перезарядку", с увеличенным максимальным числом двойных ходов рабочей клети, расширенным диапазоном величины подачи и оснащен индивидуальными серводвигателями малой мощности для вращения механизмов зажима стержня оправки, патронов подачи и переднего патрона. Кроме того, для нового стана был обеспечен более экономичный режим работы главно-



Рис. 3. Серводвигатель

го привода (привода рабочей клети) в целях снижения потребляемой из сети электроэнергии.

Для получения привода поворота, обладающего высокими динамическими показателями, используются четыре серводвигателя (рис. 3), осуществляющие синхронный поворот заготовки, стержня оправки и переднего патрона зажима готовой трубы. Синхронизация углов поворота всех серводвигателей осуществляется с помощью специализированного контроллера управления движением "Trajexia" фирмы Omron. Для оптимального выбора мощности серводвигателей для всей гаммы станов ХПТ в ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ" была разработана программа расчета (рис. 4), позволяющая по минимальному количеству входных данных (статический момент сопротивления, момент инерции механизма) определить конкретный тип серводвигателя и проверить его по динамическим показателям и нагреву. Данная программа позволяет получить расчетные данные для оптимальной настройки системы управления сервоприводов. Осциллограммы отработки заданного перемещения приводом поворота приведены на рис. 5.

Работа стана без остановки на "перезарядку" осуществляется с помощью двух работающих с перехватом приводов подачи заготовки (рис. 6), оснащенных индивидуальными серводвигателями. Их динамические показатели существенно повышены в результате уменьшения длины винта подачи от 5 до 1,5 м, а следовательно, суммарного момента инерции механизма и распределения цикловой нагрузки между двумя сервомоторами.

Для уравновешивания динамического момента, возникающего при возвратно-поступательном движении рабочей клети, применены контргрузы на валу кривошипных шестерен и маховики, роль которых играют кривошипные шестерни и ведомый шкив клиноременной передачи, имеющие относительно большие размеры по наружному диаметру. Это позволяет снизить динамические нагрузки на двигатель главного привода. Кроме того, при формировании с помощью управляемого преобразователя частоты механической характеристики двигателя главного привода, снижается потребляемая из сети активная мощность,

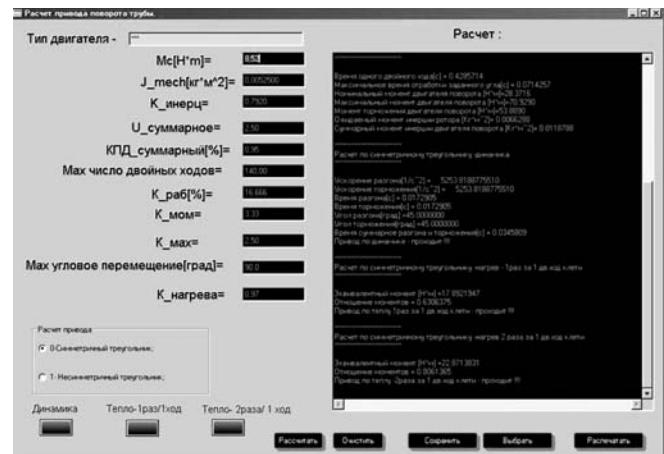


Рис. 4. Окно программы расчета параметров сервопривода

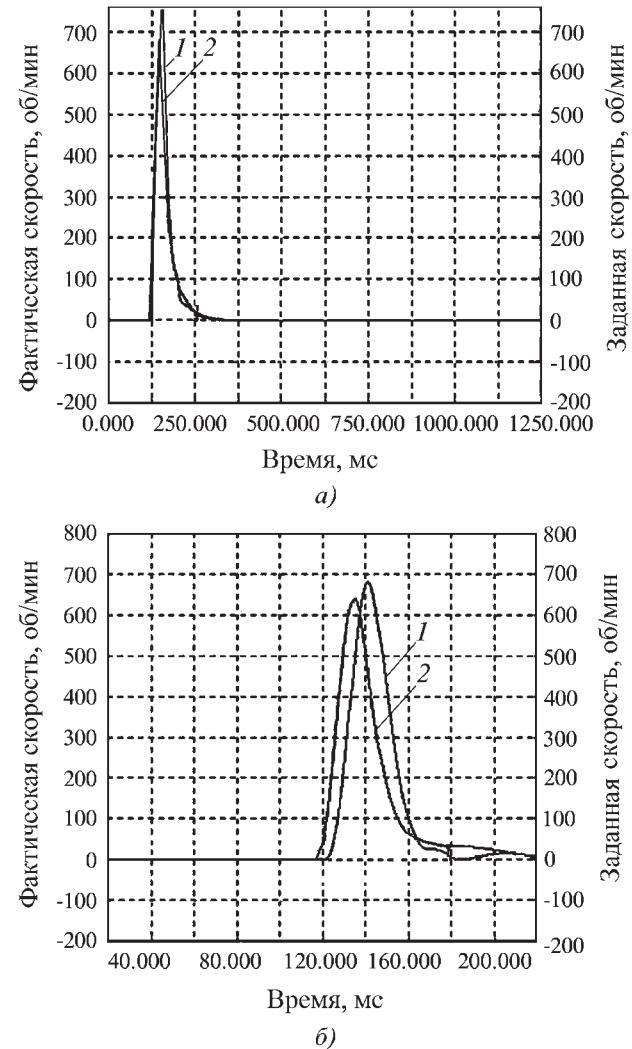


Рис. 5. Осциллограммы отработки максимального перемещения 90°:

*a* – заводские параметры сервопривода; *b* – рассчитанные параметры сервопривода; 1 – фактическая скорость; 2 – заданная скорость



Рис. 6. Патрон подачи заготовки стана ХПТ 6-20

а возникающие в процессе прокатки статические и динамические моменты сопротивления преодолеваются в результате работы маховых масс. Используя такой метод управления двигателем главного привода, специалистам ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ" удалось снизить установленную мощность главного привода стана ХПТ 6-20 от 30 до 22 кВт, а в перспективе – и до 18,5 кВт. При этом фактическая потребляемая из сети мощность на рабочих режимах оказывается еще меньшей, чем установленная мощность. Такой шаг существенно повышает энерговооруженность стана и значительно влияет на себестоимость производимой продукции.

Рис. 7. Устройства загрузки и выгрузки стана ХПТ 6-20:  
а – устройство загрузки; б – устройство выгрузки

Полностью автоматизированный стан ХПТ 6-20 нового поколения снабжен устройствами загрузки и выгрузки (рис. 7), работающими в автоматическом режиме и позволяющими осуществлять прокатку "бесконечной трубы".

Стан холодной прокатки труб ХПТ 6-20 был спроектирован и собран в ОАО АХК "ВНИИМЕТМАШ" в течение 8 месяцев. 1 февраля 2008 г. был подписан акт о принятии его в эксплуатацию. Таким образом, созданием стана ХПТ 6-20 положено начало нового поколения полностью автоматизированных станов холодной прокатки труб.

*Александр Александрович Боровик,  
инженер-конструктор,  
borovikaa@mail.ru*



В.Ф. Бабаев  
НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА МЕТАЛЛОПРОКАТА И СТАЛЬНЫХ ТРУБ  
Справочник  
МАШИНОСТРОЕНИЕ

## НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА МЕТАЛЛОПРОКАТА И СТАЛЬНЫХ ТРУБ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ: справочник

**В.Ф. Бабаев**

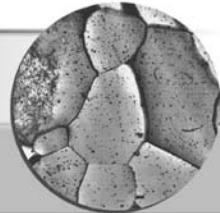
2010. – 160 с. ISBN: 978-5-94275-498-3

**Цена 500 р.**

Приведена методика расчета норм расхода металлопроката (сортовой прокат, листовой прокат, рулонные материалы и др.) и стальных труб, широко применяемая в машиностроении и металлообработке, с учетом стоимости материала, типа производства, размера квартальной потребности в прокате, метода раскроя материала (на штучные или групповые заготовки, комбинированный раскрой) и т.п. Учтены передовые формы организации производства и другие достижения по экономическому расходованию материалов.

Для специалистов и инженерно-технических работников предприятий, научно-исследовательских организаций, занимающихся вопросами нормирования расхода и эффективного использования материальных ресурсов; также полезен преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:  
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)  
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)



УДК 669.018

В.И. Кошкин, А.Н. Кравченков, И.Б. Руденко, А.Д. Шляпин  
(Московский государственный индустриальный университет)

### Применение эффекта адиабатического сдвига для поверхностного легирования конструкционных материалов

На примере взаимодействия низкоуглеродистой стали и свинца показано, что если в зоне электроимпульсного или электромеханического воздействия на поверхности конструкционного материала находится легирующий элемент, то при определенных условиях может наблюдаться его интенсивная миграция на значительные расстояния вглубь обрабатываемого материала. Наблюдаемый процесс объясняется взаимодействием полос адиабатического сдвига, возникающих под воздействием электрических импульсов и тяжелого легкоплавкого компонента и может быть использован для поверхностного легирования конструкционных материалов тяжелыми легкоплавкими элементами.

The interaction of low-carbon steel and lead under the action of electric- or electromechanical impulse is shown to be accompanied by intense migration of low melting element over long distances inside the processed structural material. The process observed is explained by the interaction of adiabatic shear bands occurring under the influence of electrical pulses and heavy low-melting component and can be used for surface alloying of structural materials with the latter.

**Ключевые слова:** полосы адиабатического сдвига; легирование поверхностное; конструкционные материалы; элементы легкоплавкие.

**Keywords:** adiabatic shear bands; surface alloying; structural materials; low melting point elements.

Целью данного исследования является изучение возможности применения эффекта адиабатического сдвига для легирования конструкционных материалов элементами практически в них не растворимых (например, поверхностного легирования сталей свинцом).

Феноменологические исследования процессов скоростной пластической деформации металлов позволили установить, что деформация протекает негомогенно и сконцентрирована в узких полосах сдвига. Локализация пластического сдвига является следствием резких структурных изменений в материалах и может сопровождаться полиморфными превращениями, фрагментацией, ориентационной и ротационной неустойчивостью.

Механизм образования полос сдвига, предложенный в работе Зеннера и Холломона (Effect of strain rate on plastic flow of steel // J. Appl. Phys. 1944. Vol. 14. P. 22–32), сводится к следующему. Пластический сдвиг при высокоскоростном нагружении первоначально происходит в нескольких локальных зонах с выделением тепла, обусловленным работой пластической деформации. За время деформации практически не успевает происходить теплообмен между областью, нагреваемой за счет интенсивного сжатия и пластического течения, и окружающей средой. При этом адиабатический нагрев может вызвать значительное повышение температуры в локализованном объеме и снижение локального предела текучести. Малые времена деформации делают процесс близким к адиабатическому. Локальное падение предела текучести в нагретой зоне приводит к интенсификации в ней пластического

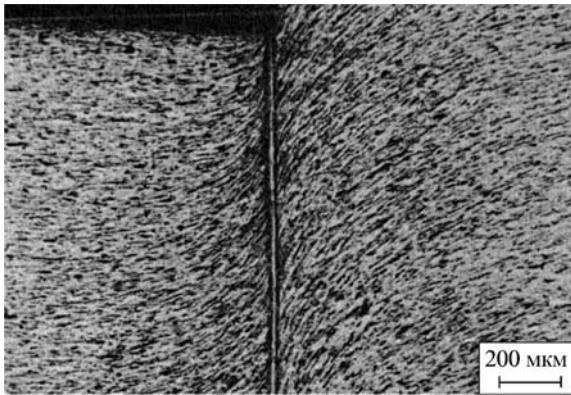
текущения, еще большему выделению тепла и дальнейшему падению предела текучести. Таким образом, процесс развивается вплоть до разрушения материала в зоне сдвига и в ряде случаев оплавления поверхности разрушения. Быстрое последующее остывание приводит к изменению микроструктуры материала в полосе сдвига.

Области сильно локализованной пластической деформации называют полосами адиабатического сдвига (ПАС). Пластическая деформация в области ПАС достигает ~100 %, а скорость деформации составляет  $10^6 \dots 10^8 \text{ с}^{-1}$  [1, 2].

Теплота, выделяемая при пластическом деформировании, концентрируется в окрестности полосы сдвига только в том случае, когда ее выделение происходит быстрее, чем ее отвод за счет механизма теплопроводности. Так как степень локального разупрочнения увеличивается с повышением температуры, деформация локализуется в ПАС, и разрушение происходит по плоскостям микроскопического скольжения. ПАС всегда имеет конечную толщину, поэтому температура материала в области сдвига зависит также от ширины полосы сдвига.

Типичная микроструктура ПАС показана на рис. 1.

Открытие эффекта взаимодействия ПАС с металлическими и неметаллическими элементами, находящимися на поверхности деформируемого тела, положило начало новому актуальному научно-техническому направлению. ("Явление взаимного массопереноса контактирующих твердых металлических веществ при импульсном воздействии" (авторы д-р техн. наук Ю.С. Абраамов, д-р физ.-мат. наук Н.П. Ка-



**Рис. 1. Полоса адиабатического сдвига, образованная в холоднокатаной стали тупоконечной пулей**

лашников, д-р физ.-мат. наук В.И. Кошкин, акад. РАН В.Е. Панин, чл.-кор. РАН К. Шамшев, д-р техн. наук А.Д. Шляпин; Российская академия естественных наук, международная академия авторов научных открытий и изобретений. Москва, 2007. Диплом № 322).

Было обнаружено, что при интенсивном импульсном воздействии (ударно-волновом, электроимпульсном, электромеханическом) на зону контакта твердых металлических веществ происходит взаимный массоперенос контактирующих веществ от исходной контактной поверхности на расстояния, определяемые энергией и длительностью импульсов. Переносимые массы вещества и расстояния оказались на порядки больше приведенных в [4]. В данной схеме взаимодействия разгона частиц до сверхвысоких скоростей не требуется. Впервые экспериментально обнаружено, теоретически обосновано и подтверждено на примере Cu–Pb, Al–Pb, Fe–Pb, Fe–Pb–Sn, Fe–Pb–Cu, Fe–Pb–W, Fe–Pb–Cu–W явление взаимного проникания компонентов при ударно-волновых, электроимпульсных, электромеханических воздействиях на контактирующие разнородные металлические реагенты.

Аналогов данному явлению не обнаружено.

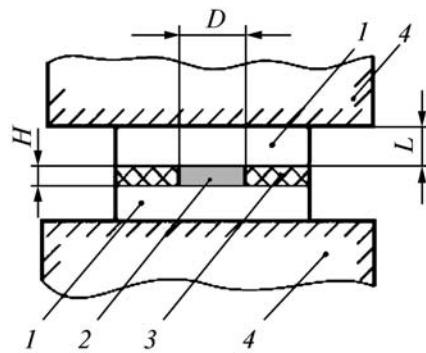
Ценность этого открытия для науки и практики может быть кратко сформулирована следующим образом:

1. Аномально быстрая миграция металлических и неметаллических частиц конечных размеров по "каналам", обозываемым ПАС, на расстояние до нескольких сантиметров является новым эффектом в физическом материаловедении и после соответствующего теоретического осмысления, несомненно, дополнит и изменит многие представления о структурных и фазовых превращениях в твердых телах в неравновесных условиях. В отечественной и зарубежной литературе отсутствуют упоминания о подобных эффектах.

2. Обнаруженный эффект открывает широкие перспективы для создания новых уникальных поверхностно- и объемно-легированных композиционных материалов (КМ) специального назначения в системах несмешивающихся компонентов, производство которых традиционными способами невозможно.

#### Методика электроимпульсного воздействия на контактирующие разнородные металлы

Контактное взаимодействие в системах металлических компонентов (преимущественно с ограниченной взаимной



**Рис. 2. Схема зоны контакта металлов, на которую действуют электрические импульсы:**

1 – цельнометаллические пластины; 2 – специально подготовленный образец; 3 – изолятор; 4 – медные контакты

растворимостью в жидком состоянии) в условиях пропускания электрических импульсов изучали на специально созданной установке [5, 6]. Она состоит из трансформатора тока, генератора формирования пакета импульсов, блока управления трансформатором тока и регистрирующего устройства. Регистрация тока и формирование воздействующих импульсов осуществляются программно, посредством управляемого компьютера, а для синхронизации электрических процессов установлена связь между сетевым напряжением на входе блока управления трансформатором тока и управляемым компьютером.

Экспериментальные образцы представляли собой сборки, состоящие из нескольких находящихся в контакте разнородных частей. Две из них – это цельные металлические пластины из стали, алюминия и меди, толщина которых в большинстве экспериментов составляла 1...8 мм. Другая часть формировалась различными способами: использовались либо порошки Cu, Pb, Sn, W, Fe, либо цельные образцы. Схематическое изображение варианта сборки для электроимпульсной обработки представлено на рис. 2 – две металлические пластины, зажимающие шайбу (текстолит, слюда) с отверстием в центре, заполненным смесью порошков либо цельным образцом соответствующего размера. Размеры центральной области сборки подбирались таким образом, чтобы тепла  $Q$ , выделяемого при одном импульсе, хватало для перевода материала в жидкое состояние (например, для свинцового цилиндра диаметром 8 мм и высотой 1 мм  $Q \geq 36 \text{ Дж}$ ).

В экспериментах с медными, алюминиевыми и стальными матрицами через сборку пропускали импульсы тока длительностью 10 мс и скважностью  $q = 2$ , а характерные значения амплитудной плотности тока через сборку составляли  $(1...4) \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ .

*(Установка для обработки токопроводящих материалов импульсами электрического тока с генерацией параметров процесса изменения их физико-механических свойств запатентована. Заявка № 2007121857 от 13 июня 2007 г.).*

На описанной выше установке изучали контактное взаимодействие свинца со сталью. Макроснимок зоны контактного взаимодействия в поперечном сечении показан на рис. 3.

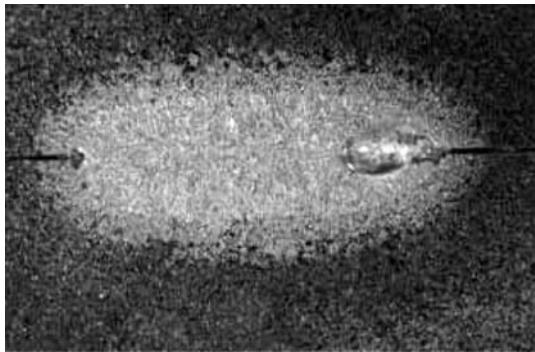
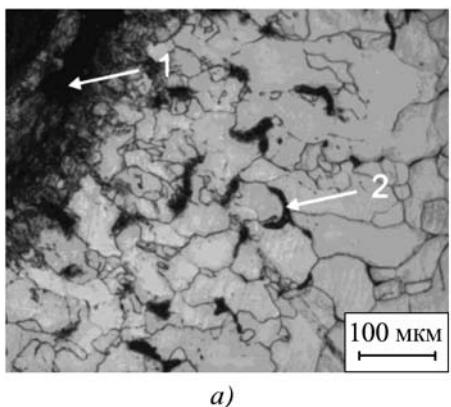


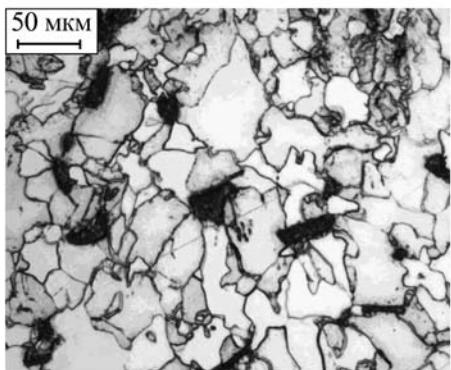
Рис. 3. Макроструктура зоны контактного взаимодействия стали и свинцового порошка после прохождения электрического импульса.  $\times 10$

Микроструктуры при различных увеличениях приведены на рис. 4.

Проникание включений свинца в сталь без оплавления последней на значительные расстояния (иногда достигающие нескольких миллиметров) может иметь только одно объяснение, связанное с образованием в приповерхностной зоне стали ПАС. Высокоскоростная деформация, необходимая для формирования ПАС, обеспечивается электриче-



*a)*



*б)*

Рис. 4. Микроструктура стали после действия электрических импульсов на контактирующие сталь и свинец:

*а* – сталь с включениями свинца, сопряженная с зоной монотектического оплавления, 1 – зона монотектического оплавления; 2 – включения свинца; *б* – включения свинца в стальной пластине

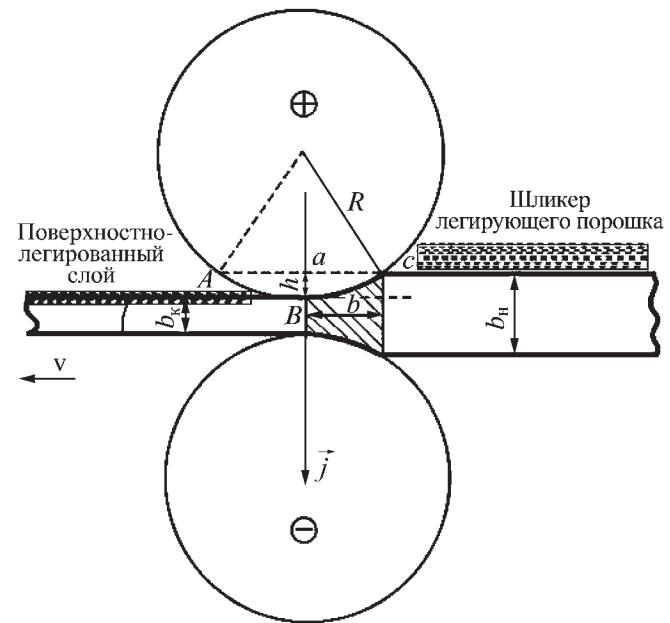


Рис. 5. Схема электромеханического воздействия на контактирующие разнородные проводящие материалы

ским импульсом в зоне контакта. На поверхности шлифа видны сечения поверхностей адиабатического сдвига плоскостью шлифа.

Приведенные выше результаты доказывают принципиальную возможность поверхностного легирования стали свинцом. С практической точки зрения больший интерес должна представлять установка для поверхностного легирования значительных площадей (например, образцов в виде лент). Для этого предлагается схема легирования, представленная на рис. 5.

В данной схеме легирования по существу речь идет об электромеханическом легировании, что подразумевает сочетание одновременного воздействия электрических импульсов и обжатия. Электромеханическое воздействие ранее применяли для повышения пластичности хрупких материалов. В данных экспериментах электроимпульсная деформация применяется для поверхностного легирования конструкционных материалов различными элементами, придающими поверхности заданные свойства, в частности, тяжелыми легкоплавкими элементами. Результат достигается благодаря использованию в способах обработки металлов давлением наряду с механической обработкой металла, импульсного тока, прикладываемого к обрабатываемой заготовке в зоне деформации. Плотность импульсов тока, их длительность и частота определяются экспериментальным путем. Каждый участок заготовки, проходя зону деформации, подвергается последовательному воздействию импульсов тока. Амплитудная плотность тока является силовым фактором действия тока. Она вместе с длительностью импульсов определяет импульс силы и импульс энергии тока, действующих на заготовку в зоне деформации.

Импульсы тока прикладываются к заготовке таким образом, что направление вектора плотности тока  $j$  преимущественно совпадает с направлением основных пластических деформаций в заготовке в зоне между валами.



**Рис. 6. Макроснимок обратной стороны стальной пластины, легированной в режиме электромеханического легирования.**  $\times 10$

Один из примеров применения электромеханического легирования приведен на рис. 6. Стальную пластину легировали из шликера медно-свинцового порошка. На рис. 6 показана обратная сторона стальной пластины на которой хорошо видны включения меди, "проникшие" через пластину. В объеме пластины также наблюдается значительное количество частиц свинца и меди, равномерно распределенных по объему.

Показано, что благодаря возникновению при высокоскоростной деформации полос адиабатического сдвига возможно проникание по этим полосам тяжелых легкоплавких элементов в приповерхностный объем конструкционных материалов (например, свинца в сталь).

◆◆◆  
УДК 621.791

**В.В. Овчинников** (*Московский государственный индустриальный университет*)

## Влияние режима термической обработки на структуру и свойства листов сплава АВ\*

*Сплавы системы Al–Mg–Si имеют комплекс ценных свойств: хорошую коррозионную стойкость, технологичность, достаточно высокую пластичность, способность подвергаться цветному анодированию, эмалированию. При холодной деформации материалы этой системы мало упрочняются в отличие от широко применяемых сплавов системы Al–Mg, которые быстро наклеиваются. Приведены результаты исследований прочностных свойств и структуры листов сплава AB в зависимости от режима термической обработки.*

*Alloys of system Al–Mg–Si have combination of the valuable properties: good corrosion resistance, technological effectiveness, sufficiently high plasticity, the ability to undergo colored anodizing, enameling. With the cold deformation the materials of this system little it is strengthened, in contrast to the widely used alloys of the systems Al–Mg, which rapidly rivet. The results of studies of the strength properties and structure of the sheets of alloy AB in the dependence on the regime of heat treatment are given.*

**Ключевые слова:** сплавы системы Al–Mg–Si; холоднокатаные листы; размер зерна; регламентированная структура; термомеханическая обработка; искусственное старение; механические свойства; холодная штамповка.

**Keywords:** alloys of system Al–Mg–Si; cold-rolled sheets; grain size; the regulated structure; thermomechanical treatment; artificial ageing; mechanical properties; cold pressing.

**Введение.** Постоянно растущий интерес к применению алюминиевых сплавов в конструкции транспортных средств связан с комплексом ценных свойств этих сплавов. В боль-

\* В работе также принимали участие О.Е. Грушко, М.А. Гуреева, В.В. Алексеев.

Полосы адиабатического сдвига могут возникать при импульсных воздействиях различной природы на данный конструкционный материал.

### Выводы

Одним из методов создания ПАС может быть электроимпульсное воздействие. Созданы установки для точечного и поверхностного легирования и проведены предварительные эксперименты, подтверждающие сделанные предположения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2-х т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
2. Moss G.L. (1981). Shear strains, strain rates and temperature changes in adiabatic shear bands. In Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals, eds. M.A. Meyers and L.E. Murr. P. 299–312. New York: Plenum Press.
3. Атом-вакансационные состояния в кристаллах / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, Ю.А. Хон, Т.Ф. Елсукова // Изв. вузов. Физика. 1982. № 12. С. 5–29.
4. Взаимодействие потока частиц с материалом преграды/ Г.Г. Черный // ДАН СССР. 1987. Т. 22. № 6. С. 1324–1328.
5. Кошкин В.И., Нижник В.А., Руденко И.Б., Шляпин А.Д. Получение антифрикционных металлических композиционных материалов с помощью электроимпульсной обработки // Известия МГИУ. 2006. № 1. С. 2–7.
6. Кошкин В.И., Руденко И.Б., Нижник В.А., Шляпин А.Д. Решение ФИПС от 19.07.2007 (отдел № 22) о выдаче патента на полезную модель на заявку № 2007121857/22, поданной 13.06.2007.

Валерий Иванович Кошкин, д-р физ.-мат. наук;  
Антон Николаевич Кравченков, аспирант;  
Игорь Борисович Руденко, начальник  
информационно-аналитического центра;  
Анатолий Дмитриевич Шляпин, д-р техн. наук,  
ashliapin@list.ru

шинстве случаев для корпусов легковых автомобилей алюминиевые сплавы применяют для деталей, полученных методом листовой штамповки из листов толщиной 0,8...2,5 мм, для которых требуется хорошая штампуемость в сочетании с достаточными прочностными характеристиками в готовом изделии.

Из анализа патентов и технической литературы следует, что за рубежом в автомобильной промышленности для деталей корпуса применяются два типа алюминиевых сплавов – термически неупрочняемые сплавы систем Al–Mn серии 3000, Al–Mg серии 5000 и термически упрочняемые сплавы систем Al–Cu, Al–Cu–Mg, Al–Mg–Si и Al–Mg–Si–Cu серий 2000 и 6000.

Из термически неупрочняемых сплавов наиболее широко используют листы сплава марки 5182-0, имеющие в отожженном состоянии мелкозернистую структуру и хорошую штампуемость. Отрицательным свойством сплавов серии 5000 при холодном формообразовании является быстрая наклепываемость и склонность к образованию линий Людерса, что ограничивает их применение внутренними деталями корпуса [1, 2].

Эффект упрочнения алюминиевых сплавов при сушке окрашенных деталей ( $170\ldots200^\circ\text{C}$ ) сильно зависит от типа сплава. Сплавы серии 2000, такие как наиболее используемые 2008 и 2036, имеют низкий эффект старения при сушке краски и уступают по прочности сплавам серии 6000 (Al–Mg–Si и Al–Mg–Si–Cu) (Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. М.: Машиностроение, 1975).

Способность к формируемости при холодной штамповке и коррозионная стойкость листового материала из сплавов серии 6000 находятся на уровне термически неупрочняемых сплавов системы Al–Mg. При этом после сушки краски они имеют более высокие прочностные свойства в результате подстаривания и дают возможность получать наиболее высокое качество поверхности детали.

В Европе в качестве основного сплава для наружных деталей корпуса применяют хорошо штампаемый сплав 6016, в Северной Америке преобладают сплавы более высокой прочности марок 6111, 6061, что обеспечивает более высокую устойчивость материала против вмятин. Из отечественных сплавов системы Al–Mg–Si наиболее близким к зарубежным сплавам по уровню механических свойств и пластичности является сплав марки АВ, из которого изготавливают листы толщиной  $0,3\ldots10,5$  мм в трех состояниях: отожженном (АВМ); закаленном и естественно состаренном (АВТ); закаленном и искусственно состаренном (АВТ1). Полуфабрикаты из сплавов системы Al–Mg–Si, в том числе и листы из сплава АВ, склонны к разнозернистости с выраженной текстурой рекристаллизации, что резко снижает их способность к формируемости и ухудшает внешний вид детали, получаемой при холодной штамповке.

Цель данной работы – определение режима термомеханической обработки листов сплава АВ для получения структуры с регламентированным размером зерна  $20\ldots40$  мкм с высокими показателями формируемости.

**Методика проведения исследований.** В качестве материала использовали листы алюминиевого сплава АВ (табл. 1), полученные в промышленных условиях. Для получения холоднокатанных листов были отлиты полунепрерывным методом плоские

слитки сечением  $147\times540$  мм из сплава АВ, которые подвергали гомогенизационному отжигу по следующему режиму: температура  $(530 \pm 10)^\circ\text{C}$ , выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе.

Горячую прокатку слабов осуществляли при температуре  $(410 \pm 10)^\circ\text{C}$  до толщины 8 мм. Холодную прокатку до конечной толщины 1,5 мм проводили с промежуточным отжигом при толщине 4 мм  $(360 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 3 ч, охлаждение на воздухе. Это соответствовало степени холодной деформации 60 %. Свойства листов в нагартованном состоянии соответствуют следующему уровню:  $\sigma_b = 185$  МПа,  $\delta = 7,8\%$ .

На полученных холоднокатанных листах сплава АВ исследовали влияние скорости нагрева под закалку, время выдержки при температуре под закалку, а также различные режимы старения.

Нагрев под закалку листов осуществляли в воздушной печи (медленный нагрев) и в селитровой ванне (быстрый нагрев). Время выдержки при температуре под закалку изменяли от 1 с до 20 мин.

Старение листов проводили для выбора режима, обеспечивающего максимальный уровень механических свойств, и режима, позволяющего совместить старение с сушкой лакокрасочного покрытия для получения при этом прочностных свойств на уровне 70...80 % от максимальных.

Структуру холоднокатанных листов исследовали на шлифах в направлении, перпендикулярном прокатке, после электрохимической полировки с последующим травлением в 0,5%-ном растворе плавиковой кислоты. Зеренная структура наблюдалась в поляризованном свете, для чего на поверхность шлифа наносили анодную пленку в электролите, содержащем 11 г борной кислоты, 30 мл плавиковой кислоты и 2000 мл воды, при напряжении 30 В в течение 2 мин при комнатной температуре. Степень рекристаллизации оценивали по сечению листа.

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497 на образце с рабочей частью 90 мм в поперечном направлении.

Коррозионную стойкость к межкристаллитной коррозии определяли в соответствии с ГОСТ 9.021–74 (раствор № 1 – водный раствор 1 % HCl + 3 % NaCl, 1 сут) и к расслаивающей коррозии по ГОСТ 9.904–82 (раствор № 4 на 1 дм<sup>3</sup> воды 13,5 г HCl (или 30 мл) + 20 г K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 7...14 сут).

Допустимый коэффициент выдавки листов сплава АВ в состоянии Т производился на прессе 750 кН в матрице диаметром 54,7 мм с радиусом  $R_m = 12$  мм сферическим пулансоном диаметром 50 мм. Коэффициент выдавки рассчитывали по формуле

$$K_{\text{выд}} = H_{\text{куп}} / (D - S),$$

где  $H_{\text{куп}}$  – высота купола, мм;  $D$  – диаметр матрицы, мм;  $S$  – толщина образца, мм.

Критерием окончания испытаний является образование трещин на внешней стороне радиуса гиба и количественно оценивается показателем  $R_{\min}$ . Чем меньше этот показатель, тем технологичнее материал.

### 1. Химический состав (% мас.) листов из сплава АВ

Толщина листа, мм	Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Cr	Ti	Zn	Al
1,5	0,83	0,6	0,27	0,44	0,39	0,05	0,05	0,19	Остальное

**Результаты исследований и их обсуждение.** При определении длительности нагрева под закалку при 530 °C было установлено, что при выдержках менее 1 мин (рис. 1) наблюдается снижение относительного удлинения при максимальном росте упрочнения сплава. Как показано в работе И.Н. Фридляндера (Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1979), это обусловлено тем, что при выдержках менее 1 мин растворение легирующих компонентов не успевает пройти в достаточной степени, однако при этом происходит частичное удаление вакансий из твердого раствора и наблюдается существенное ослабление межзеренной связи, что и приводит к снижению относительного удлинения. При выдержках нагрева под закалку 1 мин и более происходит практически полное растворение легирующей фазы и устраняется избыток вакансий, межзеренная связь укрепляется.

Установлено, что сплав, выдержанный при нагреве под закалку 20 с, при искусственном старении (170 °C, 10 ч) не способен упрочняться. Следовательно, время выдержки нагрева под закалку не должно быть меньше 1 мин. При быстром нагреве (в селитровой ванне) время выдержки составляло 3 мин, а при нагреве под закалку в воздушной печи – 10...20 мин.

Анализ микроструктуры показал, что листы, нагретые под закалку в воздушной печи, имеют ярко выраженную

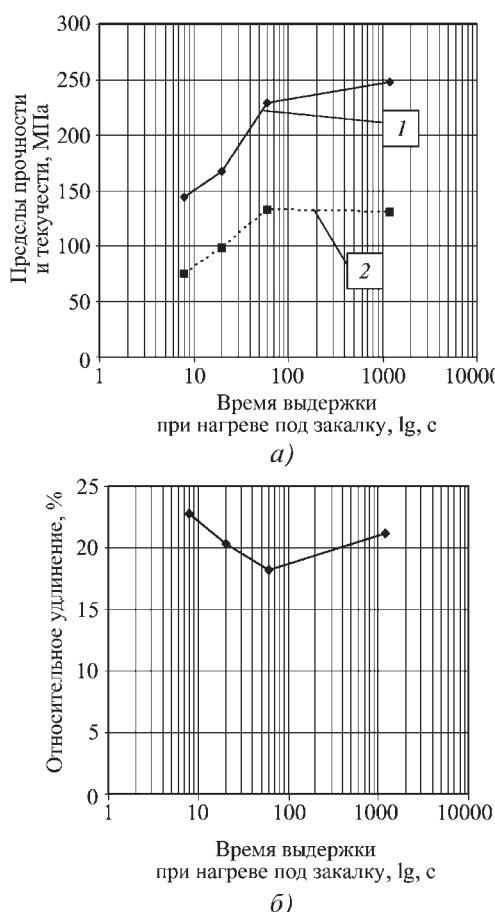


Рис. 1. Влияние времени выдержки нагрева под закалку при 530 °C на механические свойства листов сплава АВ:  
1 – предел прочности; 2 – предел текучести

## 2. Влияние времени вылеживания закаленных листов сплава АВ (направление – вдоль прокатки)

Время вылеживания, сут	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Свежезакаленные	$174\ldots187^*$ 180	$44\ldots58$ 51	$26,7\ldots27,6$ 27,2
7	$278\ldots281$ 280	$121\ldots132$ 127	$27,4\ldots28,0$ 27,7
30	$295\ldots299$ 297	$156\ldots161$ 158	$23,3\ldots26,1$ 24,7

\* В числителе приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе указано среднее значение.

текстуру рекристаллизации, зерно вытянуто в направлении прокатки. Размер зерна 30×250 мкм. Нагрев этих же листов в селитровой ванне обеспечивает получение рекристаллизованной структуры с зерном, близким к равноосному, размером 20×40 мкм.

Установлено, что листы сплава АВ (табл. 2) подвержены естественному старению. Основной прирост прочностных свойств, особенно предела текучести (более чем 15 %), происходит в первые 7 сут, дальнейшее увеличение выдержки до 30 сут изменяет свойства в меньшей степени. Следует отметить, что относительное удлинение сплава при естественном старении изменяется не более чем на 15 %.

Для сплавов типа АВ обычно рекомендуется температура старения в интервале 150...170 °C. В настоящей работе исследовано влияние времени выдержки при температуре 170 °C в процессе старения на механические свойства листов при растяжении (табл. 3). Максимальный уровень свойств достигается при выдержке 14 ч. При дальнейшем увеличении продолжительности старения до 24 ч уровень

## 3. Влияние времени выдержки при старении 170 °C на механические свойства закаленных листов сплава АВ (долевое направление, перерыв между закалкой и старением 7 сут)

Время выдержки, ч	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
0,5	$278\ldots283$ 281	$134\ldots142$ 139	$24,0\ldots25,8$ 24,7
2	$306\ldots311$ 308	$178\ldots190$ 184	$20,4\ldots21,6$ 21,4
3	$323\ldots325$ 324	$195\ldots208$ 202	$19,8\ldots20,4$ 20,1
10	$342\ldots349$ 345	$241\ldots250$ 245	$13,8\ldots14,7$ 14,2
14	$352\ldots352$ 352	$298\ldots298$ 298	$12,3\ldots14,4$ 13,3
20	$344\ldots346$ 345	$291\ldots300$ 295	$11,6\ldots12,2$ 11,9
24	$349\ldots351$ 350	$295\ldots301$ 298	$11,9\ldots12,9$ 12,4

**4. Механические свойства листов при кратковременных выдержках, имитирующих сушку покраски  
(долевое направление, перерыв между закалкой и старением 7 сут)**

Режим старения		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	% от максимума	
Температура, °C	Выдержка, мин				$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$
170	30	$\frac{278 \dots 283}{281}$	$\frac{134 \dots 142}{139}$	$\frac{24,0 \dots 25,8}{24,7}$	80	47
	120	$\frac{306 \dots 311}{308}$	$\frac{178 \dots 190}{184}$	$\frac{20,4 \dots 21,6}{21,4}$	87	62
180	30	$\frac{283 \dots 291}{287}$	$\frac{158 \dots 160}{159}$	$\frac{22,4 \dots 24,2}{23,5}$	82	53
	60	$\frac{299 \dots 305}{302}$	$\frac{171 \dots 173}{172}$	$\frac{20,9 \dots 22,4}{21,7}$	86	58
190	20	$\frac{276 \dots 281}{278}$	$\frac{144 \dots 150}{147}$	$\frac{22,9 \dots 23,1}{23,0}$	79	49
	30	$\frac{303 \dots 312}{308}$	$\frac{185 \dots 201}{194}$	$\frac{16,4 \dots 19,3}{17,5}$	87	65
200	30	$\frac{325 \dots 326}{326}$	$\frac{226 \dots 236}{230}$	$\frac{14,9 \dots 14,9}{14,9}$	93	77

прочностных свойств не изменяется, а удлинение при этом уменьшается. Поэтому рекомендуемым режимом старения листов сплава АВ для получения максимальных свойств является режим 170 °C с выдержкой 10...14 ч.

Сушка лакокрасочных покрытий при производстве деталей автомобилей обычно осуществляется при температурах 170...200 °C с выдержкой от 20 до 60 мин. Исследования показали, что при 170 °C и выдержке 30 мин сплав имеет тот же уровень свойств, что и после естественного старения и его

предел текучести составляет 47 % от максимального уровня. Чтобы обеспечить требуемый уровень свойств, время выдержки при сушке красителя при 170 °C должно быть не менее 3 ч. Такая длительная выдержка при сушке лакокрасочного покрытия технологически неоправданна и не всегда может быть принята. Поэтому было исследовано влияние более высоких температур старения с выдержкой 20...60 мин. Нагревы листов сплава АВ при 190...200 °C в течение 30 мин приводят к существенному повышению предела прочности и особенно предела текучести, что позволяет рекомендовать эти режимы для сушки лакокрасочного покрытия (табл. 4).

Анализ микроструктуры показал, что лист из сплава АВ в состоянии Т имел рекристаллизованную структуру с размером зерна 30 мкм, а в состоянии О — рекристаллизованную структуру с размером зерна 70 мкм.

На листах в состоянии Т после дополнительной нагартовки путем холодной прокатки на 10 % прочностные свойства повышаются на 100...120 МПа, а относительное удлинение снижается до 11,2 %. Увеличение степени деформации при прокатке до 40 % приводит к дальнейшему повышению прочностных свойств на 80...100 МПа при снижении относительного удлинения до 7,2 %. Прочностные свойства листов в состоянии О при нагартовке повышаются в значительно меньшей степени, а удлинение снижается более заметно (табл. 5).

Следовательно, для листов из термически упрочняемого сплава АВ исходное состояние Т перед холодной деформацией более предпочтительно с точки зрения технологичности при холодной деформации и обеспечения высокого уровня механических свойств детали.

Нагрев листов по режиму сушки лакокрасочного покрытия 190 °C, 20 мин, после нагартовки незначительно влияет на уровень прочностных характеристик, несколько повышая относительное удлинение, что свидетельствует о релаксации напряжений в деталях после холодной штамповки.

**6. Механические свойства нагартованных при разном исходном состоянии листов сплава АВ после закалки и естественного старения 17 сут**

Исходное состояние перед нагартовкой	Степень нагартовки, %	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Размер зерна, мкм
T	10	$\frac{300 \dots 300}{300}$	$\frac{120 \dots 126}{123}$	$\frac{29,2 \dots 21,4}{20,8}$	350
	25	$\frac{322 \dots 323}{322}$	$\frac{153 \dots 157}{155}$	$\frac{23,2 \dots 25,0}{24,1}$	100
	40	$\frac{316 \dots 316}{316}$	$\frac{160 \dots 164}{162}$	$\frac{24,8 \dots 27,2}{26,0}$	35
O	10	$\frac{271 \dots 282}{276}$	$\frac{126 \dots 126}{126}$	$\frac{11,1 \dots 15,9}{13,5}$	850
	25	$\frac{304 \dots 309}{306}$	$\frac{146 \dots 158}{152}$	$\frac{19,8 \dots 21,4}{20,6}$	500
	40	$\frac{294 \dots 300}{297}$	$\frac{133 \dots 147}{140}$	$\frac{22,2 \dots 25,3}{23,7}$	250

Данные, приведенные в табл. 6, показывают, что при нагреве под закалку листов, нагартованных на разную степень, увеличиваются размеры зерна (рис. 2), заметно снижаются прочностные характеристики листов при одновременном повышении значений относительного удлинения по сравнению с нагартованым состоянием. Особенно падают значения предела текучести, что нежелательно, так как это приводит к уменьшению жесткости материала и, как следствие, снижению устойчивости против вмятин, что ухудшает эксплуатационные и потребительские свойства изделия. Таким образом, для получения деталей холодной штампов-

кой предпочтительней использовать листы сплава АВ с регламентированной структурой в состоянии Т.

При длительных нагревах, имитирующих солнечные нагревы, наблюдается незначительное снижение прочностных характеристик (до 10 %) при сохранении уровня относительного удлинения.

Важной эксплуатационной характеристикой является коррозионная стойкость, оцененная по стойкости образцов к межкристаллитной и расслаивающей коррозии. Исследование влияния холодной деформации 10...40 % на коррозионную стойкость листов толщиной 1,5 мм сплава АВ в зависимости от исходного состояния и конечной обработки показало, что во всех состояниях материала свойственна высокая коррозионная стойкость. Таким образом, детали, полученные холодной штамповкой из листов алюминиевого сплава АВ, как после нагрева при сушке лакокрасочного покрытия, так и при эксплуатации, будут иметь высокую коррозионную стойкость.

Листы из сплава АВ с регламентированной структурой, использованные в настоящей работе, в состоянии Т характеризуются высокой технологичностью. При размере зерна не более 80 мкм листы имеют следующие технологические показатели:  $\delta_5 > 25\%$ ;  $K_{вып} = 1,9 \dots 1,95$ ;  $K_{отб} = 1,2 \dots 1,25$ ;  $K_{выд} = 29$ ;  $R_{min} = (0,5 \dots 1,0)S$ .

В качестве детали-имитатора выбрана штамповка в форме глубокой чашки, которая по геометрии может характеризовать такие автомобильные детали, как поддон картера, часть бензобака в зоне скруглений, т.е. такие детали, которые получают с большой степенью выдавки (рис. 3).

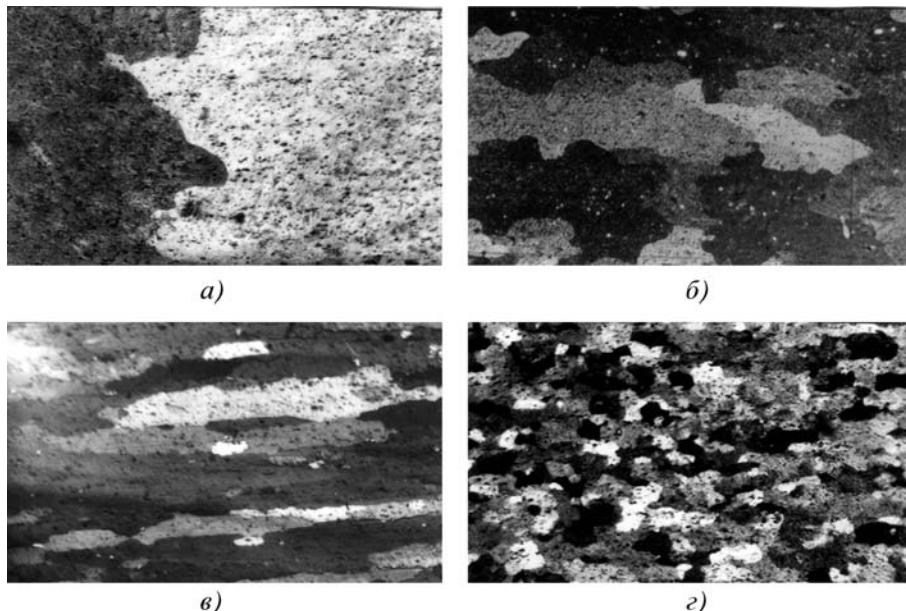
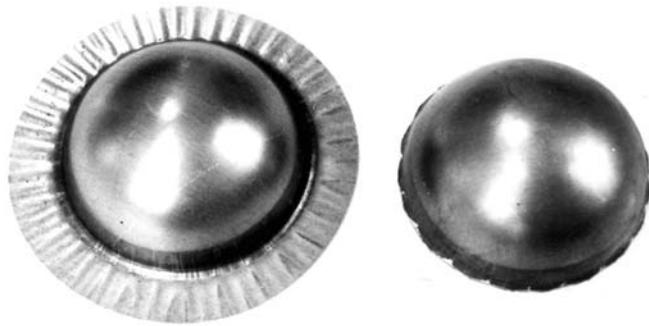


Рис. 2. Микроструктура листа толщиной 1,5 мм сплава АВ, нагартованного на 10 % (а, б) и 40 % (в, г) при исходном состоянии О (а, в) и Т (б, г) после нагрева под закалку при 530 °С, 10 мин. Цветное травление,  $\times 100$



**Рис. 3. Имитатор детали, полученный холодной штамповкой из листа алюминиевого сплава АВ с регламентированной структурой**

### Выводы

1. Показано, что необходимым условием получения листов с регламентированной мелкозернистой рекристаллизованной структурой является обеспечение высокой скорости нагрева до температуры закалки, например, в селитровой ванне.

2. Установлен рост зерна при перезакалке нагартованных образцов в результате прохождения субзакалки при рекристаллизации, что указывает на недопустимость перезакалки детали после штамповки и должно учитываться при составлении технологии получения деталей.

3. Для сохранения высокой технологичности время вылеживания листов из сплава АВ после закалки не должно превышать 30 сут.

4. Из листа алюминиевого сплава АВ, обработанного по режиму термомеханической обработки, с регламентированной зерненной структурой получен имитатор детали холодной деформацией с большой степенью выдавки при высоком качестве поверхности. Установлено, что исходное состояние Т перед холодной деформацией более предпочтительно с точки зрения технологичности при холодной деформации и обеспечения высокого уровня механических свойств детали.

5. Необходимый эффект упрочнения сплава АВ достигается благодаря старению в процессе сушки лакокрасочного покрытия при температуре 190...200 °С в течение 30...60 мин, при этом  $\sigma_{0,2} = 65\ldots77\%$  и  $\sigma_b = 87\ldots93\%$  от максимальных значений и находятся на уровне типичных свойств стального автомобильного листа.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в автомобилестроении / И.Н. Фридляnder, В.Г. Систер, О.Е. Грушко, Л.М. Шевелёва // МиТОМ. 2002. № 9. С. 3–9.

2. Гришечкин Н.И., Ковтаев Е.Е. Применение алюминиевых и титановых сплавов в автомобилестроении // Цветные металлы. 1997. № 2. С. 58–60.

*Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук,  
vikov1956@mail.ru*

◆◆◆ ◆◆◆  
ІІІ "Èçäàò åëüñò âî ì àø èí î ñò ðî áí èå" ï ðî äî ëæàåò ï î äï èñêó  
í à æöðí àë

### «Заготовительные производства в машиностроении»

- Çà í àëè÷í ûé è áåçí àëè÷í ûé ðàñ÷åò
- Ñ ëþ áî ã í î áðà è í à ëþ áî é ñðî ê.
- Áåç ï î ÷òî áû õ í àöåí î ê

Ї ðèñû èàéòå çàêàç è í áðàù àéòåñü çà äî ï î èí èòåëüí î èí ô î ðî àöèåé á î òäåë í ðî äàæ  
í àðêåðèí ãà è ðåéëàì û:

107076, а ì 1 ñêâà, Ñòðî ì û í ñêèé í åð., ä. 4,  
òåë.: (499) 269-6600, 269-5298, ô àëñ: (499) 269-4897,  
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

ООО "Издательство Машиностроение", 107076, Москва, Строгинский 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 11.01.2010 г. Подписано в печать 09.03.2010 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 7,06. Заказ 142. 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.