ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 3 март 2009

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.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
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 Г.П.
ТРУХОВ А.П.
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.
ГАНЖЕНКО А.Г.

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12218 от 29.03.02

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Валисовский И.В., Ромашкин В.Н., Нуралиев Ф.А., Петропавловская З.Н. Оптимизация составов хромитовых жидкостекольных ХТС с кремнийорганическим отвердителем . . . 3
Резчиков Е.А. Моделирование процесса уплотнения формовочной смеси . . . 6
Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств . . . 11
Крайнев А.Ф. Техника литейного производства в историческом и логическом развитии (2-я и 3-я полосы обложки)

Кузнечно-штамповочное производство

Назарян Э.А., Араб Н.Н. Деформации при отбортовке круглых отверстий в тонких пластинах . . . 22
Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н. Особенности гидроэкструзии полой заготовки из титана . . . 26
Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Носенко А.А. Режимы работы штамповочного пресса НП-130 с модернизированной электрогидравлической системой управления . . . 31

Прокатно-волочильное производство

Стулов В.В., Одиноков В.И., Черномас В.В., Дербеткин А.А., Макаров С.С. Технология получения непрерывно-литых деформированных заготовок из сплава Pb–Sb на модернизированной установке . . . 35
Гурьянов Г.Н., Коломиец Б.А., Баталов Г.В., Киселёв В.Я. Механические свойства углеродистой канатной проволоки при низкой температуре . . . 40

Материаловедение и новые материалы

Семёнов В.И. Закономерности сегрегационных атомных перегруппировок при кристаллизации эвтектик . . . 43
Казанцев А.Г., Феклистов С.И., Шуваев В.А., Войдер К.А. Определение механических свойств металла труб по данным испытаний на растяжение тангенциальных образцов с начальной кривизной . . . 48

Информация

Лузгин В.И., Петров А.Ю., Шестовских А.Е., Кандалинцев Б.А. Линия ультразвуковой очистки для подготовки поверхности длинномерных проводов и лент в заготовительных производствах . . . 53
Арсентьева Н.С., Снигирев А.И., Железняк Л.М., Марущак Л.Н., Кузьмина Е.В., Глухова О.Л. Высококачественные изделия из бериллиевых бронз, выпускаемые ОАО «Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов» . . . 54

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

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

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2009

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 3 March 2009

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.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
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 G.P.
TRUKHOV A.P.
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.
GANZHENKO A.G.

Journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. The certificate of registration ПИ № 77-12218 from 29.03.02

An advertiser is responsible for the promotional materials

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

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

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Valisovsky I.V., Romashkin V.N., Nuraliev F.A., Petropavlovskaya Z.N. Optimizing the composition of chromite liquid glass mixtures with siliconorganic hardener 3
Rezchikov E.A. Modelling of compression of forming mix process 6
Gureeva M.A., Grushko O.E., Ovchinnikov V.V. Aluminum the alloys in the constructions of transportation means to be welded 11
Krainev A.F. Technique of casting production in historical and logical evolution (2-nd and 3-d pages of cover)

Forging and Stamping Productions

Nazaryan E.A., Arab N.N. Deformations at flanging circular holes in thin plates 22
Kamenetsky B.I., Loginov Yu.N. The particularities of hydro-extrusion of titanium hollow bar 26
Goydo M.E., Bodrov V.V., Bagautdinov R.M., Nosenko A.A. Modes of operation of press NP-130 with modernized electric-hydraulic control system 31

Rolling and Drawing Productions

Stulov V.V., Odinokov V.I., Chernomas V.V., Derbetkin A.A., Makarov S.S. The technology of continuously deformed billet production of Pb–Sb alloy with upgraded plant 35
Guryanov G.N., Kolomiets B.A., Batalov G.V., Kiselev V.Ya. Mechanical properties of carbonaceous rope wire at low temperature 40

Physical Metallurgy and New Materials

Semenov V.I. Laws of segregative nuclear regroupings at eutectics crystallization . . 43
Kazantsev A.G., Feklistov S.I., Shuvaev V.A., Voider K.A. Evaluation of mechanical properties of pipe metal from tension testing of tangential specimen with initial curvature 48

Information

Luzgin V.I., Petrov A.Yu., Shestovskikh A.E., Kandalintsev B.A. Ultrasonic cleaning system for surface treatment of long-length wire and belts in blanking productions 53
Arsenteva N.S., Snigirev A.I., Zheleznyak L.M., Marushchak L.N., Kuzmina E.V., Glukhova O.L. High-quality products made from the beryllium bronze of JSC "Kamensk-Uralsky non-ferrous metal working plant" 54

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

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2009

И.В. Валисовский, В.Н. Ромашкин, Ф.А. Нуралиев, З.Н. Петропавловская
(ОАО НПО "ЦНИИТМАШ", Москва)

Оптимизация составов хромитовых жидкостекольных ХТС с кремнийорганическим отвердителем

В целях повышения качества поверхности отливок предложено использование хромитовых смесей с кремнийорганическими отвердителями; выбран оптимальный состав жидкостекольной ХТС с кремнийорганическим отвердителем и рекомендован для использования в производстве.

In order to improve the quality of the cast invited to use chromite mixtures with siliconorganic hardener, selected the best of liquid glass mixtures with siliconorganic hardener and recommended for use in cast production.

Ключевые слова: холоднотвердеющие смеси; оптимизация; прочность; отвердитель; катализатор.

Key words: mixtures; optimization; strength; hardener; catalyst.

На основе литературных данных [1] и из производственной практики известно, что оптимальная "манипуляторная" прочность ХТС должна составлять 0,5...1,5 МПа для стержней и 0,2...1,0 МПа для форм, прочность смеси к моменту заливки формы металлом – 2,0...4,0 МПа для стержней и 0,5...1,5 МПа для форм, осыпаемость смесей не должна превышать 0,2 %.

Для оптимизации составов и свойств хромитовых жидкостекольных ХТС с кремнийорганическим отвердителем (КО) использовали метод планирования эксперимента [2].

В таблице представлена матрица ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) для трех факторов и результаты опытов для смесей с КО.

В качестве исходных компонентов использовали хромитовый песок, жидкое стекло М = 2,6, кремнийорганический отвердитель и катализатор отверждения. Эксперименты проводились при температуре 20 °С и влажности воздуха 70 %. Количество жидкого стекла в исходной смеси было выбрано 3,0 мас. ч. (основной уровень). При этом исходили из физико-химической модели формирования прочности смеси, гранулометрического строения и физических свойств наполнителя, а также из составов известных смесей с КО.

Переменные факторы: КО – 0,7...2,1 мас. ч., катализатор – 1,0...1,5 % от количества жидкого стекла. Плотность жидкого стекла – 1380...1480 кг/м^3.

Учитывая производственные условия, культуру производства в литейных цехах, а также назначение смесей для производства крупных стальных отливок, при поиске оптимального состава смеси были заданы следующие технологические и физико-механические свойства:

– минимально допустимая живучесть смеси, необходимая для заполнения стержневых ящиков, должна составлять не менее 15...17 мин;

– смеси должны иметь скорость твердения, позволяющую извлекать стержни через 60...120 мин (в зависимости от класса сложности) при достижении прочности на сжатие 1,0...2,0 МПа;

– готовые стержни должны иметь прочность через 3...4 ч после изготовления, равную 2,5...3,0 МПа, позволяющую производить кантовку, транспортировку и окраску;

– смеси не должны разупрочняться при длительном хранении в течение 24 ч и иметь прочность не менее 4,0 МПа перед заливкой формы металлом;

– осыпаемость смесей не должна превышать 0,2 %.

При оптимизации состава смеси не учитывались ее высокотемпературные свойства.

Обработка результатов эксперимента показала, что значения свойств смесей отвечают условиям однородности, а уравнения – условиям адекватности. Для всех показателей были вычислены коэффициенты регрессии с проверкой их статистической значимости.

В результате обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии (1) – (6) следующих технологических и физико-механических свойств смесей: живучести (Y_1), прочности на сжатие

Матрица ортогонального центрального композиционного плана

Исходные факторы и параметры выхода		Матрица планирования										Параметры выхода					Осыпаемость, %
		Содержание жидкого стекла	Плотность жидкого стекла, кг/мм^3	Количество КО, мас. ч.	Количество катализатора от жидкого стекла, мас. ч.	Факторы второго порядка и взаимодействия						Живучесть, мин	Прочность на сжатие, МПа, через ч				
													1	2	4	24	
Обозначения		X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
Основной уровень			1430	1,4	3,0	$\tilde{X}_i^2 = X_i^2 - \frac{\sum X_i^2 j}{N}$											
Интервал варьирования (ΔX_i)			50	0,7	2,0												
Верхний уровень (+)			1480	2,1	5,0												
Нижний уровень (–)			1380	0,7	1,0												
Номер опыта	1	+	+	+	–	0,27	0,27	0,27	+	–	–	13,0	0,50	1,20	2,36	2,50	0,16
	2	+	–	+	–	0,27	0,27	0,27	–	+	–	20,0	0,60	1,70	2,60	4,30	0,23
	3	+	+	–	–	0,27	0,27	0,27	–	–	+	15,0	0,54	1,05	2,20	2,30	0,30
	4	+	–	–	–	0,27	0,27	0,27	+	+	+	21,0	0,62	1,40	2,20	2,70	0,45
	5	+	+	+	+	0,27	0,27	0,27	+	+	+	1,0	2,80	3,30	3,60	2,80	0,45
	6	+	–	+	+	0,27	0,27	0,27	–	–	+	8,0	2,80	3,50	4,36	4,15	0,35
	7	+	+	–	+	0,27	0,27	0,27	–	+	–	2,0	1,24	1,43	1,60	1,0	0,40
	8	+	–	–	+	0,27	0,27	0,27	+	–	–	5,0	0,86	1,20	1,40	1,26	0,50
	9	+	0	0	0	–0,73	–0,73	–0,73	0	0	0	14,0	2,60	4,70	4,50	4,40	0,22
	10	+	+1,215	0	0	0,75	–0,73	–0,73	0	0	0	24,0	0,60	1,50	3,30	4,40	0,18
	11	+	–1,215	0	0	0,75	–0,73	–0,73	0	0	0	6,0	3,90	4,00	4,20	4,30	0,29
	12	+	0	+1,215	0	–0,73	0,75	–0,73	0	0	0	14,0	2,70	5,10	5,20	5,40	0,16
	13	+	0	–1,215	0	–0,73	0,75	–0,73	0	0	0	15,0	2,40	3,60	3,30	2,80	0,27
	14	+	0	0	+1,215	–0,73	–0,73	0,75	0	0	0	6,0	2,80	2,80	2,60	2,00	0,24
	15	+	0	0	–1,215	–0,73	–0,73	0,75	0	0	0	28,0	0,65	1,90	2,80	3,00	0,16

П р и м е ч а н и е. В таблице представлены средние значения свойств смесей из четырех испытаний.

через 1 ч (Y_2), 2 ч (Y_3), 4 ч (Y_4) и 24 ч (Y_5), а также осыпаемости через 24 ч твердения (Y_6):

$$Y_1 = -3003{,}74 + 4302{,}06X_1 - 4{,}82X_3 - -1524{,}85(X_1 - 0{,}75)^2 - 2{,}12X_1X_2 + 0{,}76X_2X_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = -6809{,}82 + 9518{,}75X_1 + 8{,}87X_3 - -3323{,}85(X_1 - 0{,}75)^2 - 2{,}44X_1X_2 + + 2{,}64X_2X_3 - 1{,}31(X_3 - 0{,}75)^2; \quad (2)$$

$$Y_3 = -6141{,}31 + 8599{,}46X_1 + 27{,}06X_3 - -3012{,}77(X_1 - 0{,}75)^2 - 1{,}17(X_2 - 0{,}75)^2 + + 3{,}06X_2X_3 - 4{,}63(X_3 - 0{,}75)^2; \quad (3)$$

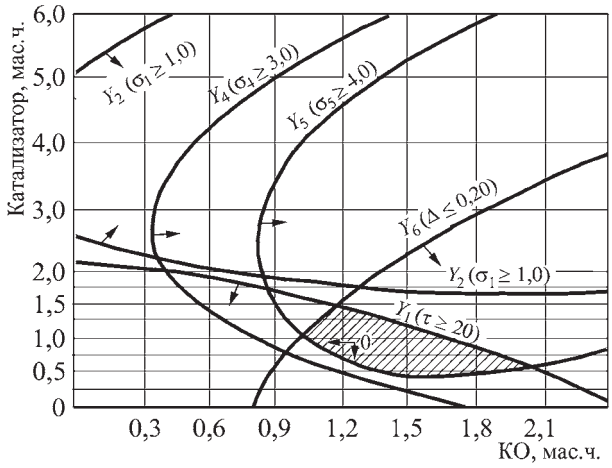
$$Y_4 = -5036{,}48 + 7002{,}82X_1 + 92{,}46X_2 + +12{,}99X_3 - 2429{,}87(X_1 - 0{,}75)^2 - 55{,}85X_1X_2 - - 5{,}13(X_2 - 0{,}75)^2 + 3{,}48X_2X_3 - 2{,}76(X_3 - 0{,}75)^2; \quad (4)$$

$$Y_5 = -6145{,}77 + 8590{,}58X_1 + 173{,}69X_2 - -10X_3 - 2995{,}74(X_1 - 0{,}75)^2 - 105{,}68X_1X_2 + + 10{,}87X_1X_3 - 6{,}16(X_2 - 0{,}75)^2 + 2{,}24X_2X_3 - - 1{,}66(X_3 - 0{,}75)^2; \quad (5)$$

$$Y_6 = 121{,}72 - 167{,}27X_1 - 1{,}47X_2 - 0{,}36X_3 + + 57{,}56(X_1 - 0{,}75)^2 + 0{,}97X_1X_2 + + 0{,}26X_1X_3 + 0{,}02X_2X_3, \quad (6)$$

где $X_1 = \frac{X_{i1} - 1430}{50}$ – плотность жидкого стекла; $X_2 = \frac{X_{i2} - 1{,}4}{0{,}7}$ – содержание КО; $X_3 = \frac{X_{i3} - 3{,}0}{2{,}0}$ – содержание катализатора; X_i – текущее значение.

На базе уравнений регрессии (1)–(6) была построена номограмма (рисунок) и определена область оптимальных составов хромитовых жидкостекольных



Номограмма для определения оптимальных составов хромитовых жидкостекольных ХТС с кремнийорганическим отвердителем

ХТС с КО. При построении номограммы были приняты ограничения, характеризующие требования, предъявляемые к технологическим и физико-механическим свойствам самотвердеющих формовочных смесей в условиях индивидуального и мелкосерийного производства, а именно: $Y_1 \geq 20$ мин, $Y_2 \geq 1,0$ МПа, $Y_3 \geq 2,0$ МПа, $Y_4 \geq 3,0$ МПа, $Y_5 \geq 4,0$ МПа, $Y_6 \geq 0,20$ %.

Эти требования позволили определить шесть областей, ограниченных функциями $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$, ..., $Y_6 = f(X_1, X_2, X_3)$, взаимное расположение которых позволило определить область оптимальных составов с необходимыми свойствами – живучестью (τ), прочностью на сжатие через 24 ч (σ_{24}) и осыпаемостью (Δ).

Анализ номограммы показывает, что наиболее жесткое ограничение на состав смеси накладывает функция живучести (Y_1). Она ограничивает максимальное содержание КО и катализатора.

Номограмма построена для плотности жидкого стекла, равной 1400 кг/м^3, при этом область оптимальных составов получается наиболее широкой.

При заданных ограничениях и качестве выбранных исходных материалов оптимальная область номограммы (заштрихованное поле) описывает составы смесей со следующим содержанием исходных компонентов: жидкого стекла – 3,0 мас. ч., КО – 1,02...2,03 мас. ч.; катализатор – 0,45...1,50 мас. ч.

В целях контроля достоверности расчетных данных в оптимальной области номограммы выбрана точка 0, которая соответствует следующему составу смеси:

– хромитовый песок – 100 мас. ч.;
– жидкое стекло (γ = 1400 кг/м^3; М = 2,6) – 3,0 мас. ч.;
– КО – 1,25 мас. ч.;
– катализатор от жидкого стекла – 0,85 %.

Были определены экспериментально технологические и физико-механические свойства этой смеси: живучесть – 26 мин, прочность на сжатие через 1, 2, 4, 24 ч твердения соответственно, 1,2; 2,0; 3,6 и 4,2 МПа, осыпаемость – 0,1 %.

Учитывая принятые выше ограничения по технологическим и физико-механическим свойствам смесей, предназначенных для получения крупных и средних отливок с чистой поверхностью, необходимо отметить большой запас по этим свойствам смеси контрольного состава. Именно этот состав смеси принят как оптимальный, выбран для дальнейших исследований и рекомендован для внедрения в производство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Жуковский С.С**. Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989. 218 с.

2. **Асатурян В.И.** Теория планирования эксперимента. М.: Радио и связь, 1983.

Игорь Васильевич Валисовский, д-р техн. наук;
Виктор Наумович Ромашкин, д-р техн. наук;
Фейзулла Алибалаевич Нуралиев, канд. техн. наук;
Зинаида Николаевна Петропавловская, д-р техн. наук

Е.А. Резчиков *(Московский государственный индустриальный университет)*

Моделирование процесса уплотнения формовочной смеси

Рассмотрена формовочная песчано-глинистая смесь, как материал формы. Обосновано, что комплексной характеристикой смеси служит ее реологическая модель. Предложена обобщенная реологическая модель формовочной смеси.

The forming sandy-argillaceous mix as material of the form is considered. It is proven, that the complex characteristic of the mix is represented by its rheological model. Generalized rheological model of the forming mix is offered.

Ключевые слова: формовочная песчано-глинистая смесь; свойства смеси; уплотнение смеси; реологическая модель смеси.

Key words: forming sandy-argillaceous mix; mix's characteristics; compression of the mix; rheological model of the mix.

Формовочная песчано-глинистая смесь (ФПГС) – уникальное явление. По своему составу она не имеет прямого подобия ни в природе, ни в антропогенной среде. В качестве аналога очень часто рассматривают грунты. Однако у них имеется ряд принципиальных отличий. Во-первых, грунты, как правило, водонасыщенные, вода в них находится в различных состояниях, в том числе в свободном виде и относительно большом количестве. Правильно подобранная и технологически верно приготовленная смесь должна иметь минимальное количество воды и желательно только в связанном виде.

Во-вторых, нагружение грунтов проходит длительно по времени и в условиях, когда масса и объем практически не ограничены. Смесь же в момент уплотнения ограничена оснасткой и нагружается в очень короткое время. Поры грунтов заполнены водой, которая при релаксации нагруженных грунтов в большинстве случаев ничем не ограничена или легко учитывается; деформированная, находящаяся в напряженном состоянии смесь подвергается новым нагрузкам при транспортировке форм и их разливке.

ФПГ-смесь – это не песок, но и не глина. Формовочная песчано-глинистая смесь отличается тем, что имеет в своем составе минералы, подобранные специально и в установленных соотношениях. Поэтому не корректно переносить грунты и их модели нагружения и уплотнения на формовку ФПГС (в данном случае не рассматривается механика грунтов, а лишь особенности нагружения ФПГС при уплотнении). Кроме того, необходимо учитывать, что грунты, как правило, – природные смеси, процессы в них длительные, во многом стабильные и прогнозируемые.

Требования к формовочной смеси по своей сути исключают друг друга. ФПГС за короткий период своего существования должна обеспечить выполнение нескольких основных технологических операций: изготовление формы (формовка), получение отливки заполнением формы расплавом и кристаллизация сплава, затвердевание металла и собственно получение отливки.

Таким образом, модель формовочной смеси должна учитывать как минимум три состояния: 1) приготовления, в оснастке без уплотнения или в дозаторе перед насыпкой в оснастку; 2) уплотнения; 3) в виде готовой формы.

В этих состояниях (а кроме них, смесь проходит стадии смесеприготовления, транспортировки к формовочной машине, транспортировки в виде формы на участок заливки, транспортировки в виде залитой формы, выбивки, подготовки оборотной смеси) ФПГС должна проявлять множество свойств, включая противоположные по своим характеристикам, например, уплотненная смесь формы должна одновременно обеспечивать высокую прочность и податливость и газопроницаемость.

Модели смеси и процесса уплотнения должны учитывать вышеуказанные особенности. Поэтому совершенно недопустимо рассматривать процесс уплотнения на так называемых "слое" смеси или "элементарном объеме" смеси.

Различные исследователи не только моделируют, но и в своих работах конкретно изучают поведение всего объема смеси в форме и смеси вообще на примере слоя смеси.

Главный недостаток такого подхода в самом определении – "слой" смеси. Неясно, что понимать под "слоем" смеси: или какой-то определенный раз и навсегда установленный объем, или слой определенной толщины, или относительную толщину слоя к высоте опоки (формы). Кроме того, ясно, что этот слой не может быть неизменным по толщине в процессе уплотнения, по крайней мере, до и после уплотнения. Если понятие "слой" смеси вводится как условное и применяется как иллюстрация к описанию предложенной модели уплотнения или модели смеси, то, в принципе, это допустимо. Но если "слой" смеси – понятие вполне определенное, то использование его, на

наш взгляд, выходит за пределы более или менее точных исследований.

Указанный недостаток не единственный. Возникают вопросы: где граница слоя? Что она из себя представляет? Как ведут себя частицы "слоя" смеси на этой границе до, во время и в момент окончания уплотнения? Все эти вопросы приверженцы моделирования по "слоям" обходят разными путями, главным образом – игнорируя.

Наибольшие возражения вызывает так называемый "элементарный слой" смеси. Если под ним понимается слой толщиной в одну частицу смеси, то его рассмотрение просто бессмысленно, так как у этого слоя нет внутрипорового пространства и уплотнять здесь нечего. При внешнем воздействии подобный слой будет до предела адгезионных связей сопротивляться тому, чтобы рассыпаться или, в лучшем случае, прорваться. Если же под "элементарным слоем" понимается часть смеси из нескольких слоев частиц, то возникает вопрос: сколько их.

При рассмотрении уплотняемого объема смеси известны четкие его границы – модельная плита и стенки опоки. Эти границы обладают определенной, вплоть до абсолютной по отношению к смеси, жесткостью. Взаимодействие смеси с границами обусловлено целым рядом известных закономерностей, основные их которых так называемые внешнее трение смеси и боковое давление. Однако эти параметры, рассматриваемые на "слоях" смеси, не могут быть определены однозначно, без учета всего объема. И вновь нерешенными остаются, например, задачи определения взаимодействия смеси и стенок опоки на границах "слоя" и, в первую очередь, "элементарного слоя". Но без этого невозможно определить процесс уплотнения. Уплотняемую, тем более уплотненную смесь нельзя представить в виде слоеного пирога, каждый из слоев которого чем-то соединен с другим.

Другой проблемой исследования смесей и определения их свойств, а значит определения качества, является использование традиционных методов испытаний и оценки. И хотя уже много лет в автоматизированном производстве от них практически отказались (об этом ниже) традиционные методы продолжают использовать и в производстве, и в экспериментах.

Яркий пример – испытание (проверка) ФПГС на газопроницаемость. Как известно, газопроницаемость – способность пропускать через себя газы – определяется при пропускании установленного объема воздуха, состав, температура и влажность которого соответствуют атмосфере помещения лаборатории, через равноуплотненный тремя ударами образец смеси во влажном состоянии.

В реальности через форму проходит с огромной скоростью меняющийся по температуре, составу и влажности поток газов. Сама смесь меняется от однородного состояния после уплотнения до многослойного, включая полностью высушенный, перегретый и даже частично выгоревший слой до соединяющего с ним переувлажненного со свободной, зачастую в виде крупных капель, влагой. Очевидно, что проводимые испытания смеси никоим образом не определяют газопроницаемость заливаемой формы.

Текучесть ФС до сих пор упрощенно определяют как свойство обратно пропорциональное вязкости без учета особенностей ФПГС, которая обладает только ей присущими специфическими свойствами. К текучести это имеет первоочередное отношение. Дело в том, что текучесть формовочной смеси проявляется и имеет значение только при приложении внешней нагрузки, т.е. во время уплотнения, а различные способы формовки предполагают различную внешнюю нагрузку от вибрации до прессования с малой скоростью и значительной нагрузкой.

С другой стороны, ФПГС имеют различный состав как по глине, так и по песку, а также по добавкам, что влияет на проявление текучести. Для сравнения были взяты четыре смеси: малопрочная на каолинитовой глине, средней прочности с очень мелким песком, с повышенной прочностью на бентоните и высокопрочная на активированном бентоните с соответствующими добавками. В качестве определения текучести использовали: стандартный метод Калашниковой, пробу Орлова и метод Кияна, в основе которого лежит сброс смеси через трубу определенной высоты (вертикальной длины) и замер рассыпания (растекания). В результате разные способы испытания давали разные сравнительные показания текучести указанных смесей.

Это объясняется тем, что различные глинистые составляющие и размеры зерен песка по своему реагируют на различные виды внешних нагрузок, а значит, сравнение ФС и их характеристик с помощью определения текучести очень условно, а порой и недостоверно.

До сих пор основной характеристикой ФС является определение поверхностной твердости. Но использовать классический метод вдавливания шарика для оценки машинных способов уплотнения недопустимо, так как состояние смеси внутри слоя по высоте формы остается неизвестным.

В автоматизированном производстве при неукоснительно выполняемой технологии смесеприготовления вопрос экспресс-контроля качества ФПГС давно решен, например с помощью чрезвычайно простого устройства, действие которого заключается в определении так называемого индекса формуемости, определяемого способностью смеси проваливаться (или не проваливаться) в щель определенной ширины при направленном вибрационном воздействии.

Стали не нужны лаборанты-пробоотборщики, многочисленные приборы, различные пересчеты – только контрольные замеры. Но потребовалось выполнение четкого условия: рецептура смесеприготовления, а значит состав смеси и технология ее приготовления, должны соблюдаться неукоснительно.

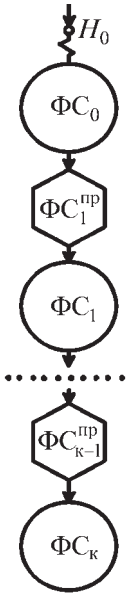


Рис. 1. Схема поведения ФГПС при уплотнении

Формовочная смесь, какая бы она не была уникальная по своим свойствам и многообразной по поведению в технологическом цикле, всего лишь рабочее тело формы.

Уплотнение ФПГС – процесс, заключающийся в удалении внутрипорового пространства и соответствующей переукладке частиц смеси, является достаточно сложным и неоднозначным. Отсюда попытки литейщиков использовать различные способы уплотнения, а значит и различное нагружение смеси*.

В целом поведение ФПГС при уплотнении можно описать схемой, приведенной на рис. 1. Неуплотненной инертной массе ФС свойственны разная степень уплотнения при заполнении опоки, наличие внешнего трения по поверхностям модельной и опочной оснастки и газовой составляющей.

Главной особенностью уплотнения ФС является то, что при этом происходит ряд превращений, а не простой переход от неуплотненной массы в плотную, твердую форму.

При любом способе нагружения первоначально преодолевается упругая составляющая H_0 смеси, которая может быть представлена как единая для всей массы. Затем происходит поэтапное изменение $ФС^{пр}$ (рис. 2), при котором различные составляющие действуют на каждом этапе по-разному и в конечном итоге приводят к уплотненному состоянию $ФС_к$, характеризующемуся удалением воздуха, перестройкой "скелета" смеси и, в конечном итоге, уменьшением пластичности, упругости, резким возрастанием вязкости.

При описании процесса уплотнения часто используется сила инерции. В большинстве случаев это приводит к несуразицам. Причина подобного ясна: сила инерции стала удобным показателем, который позволяет, на первый взгляд, прикрыть несовершенство и неточность предложенной теории.

В подвижной системе отчета силу инерции вводят для составления уравнения движения точки при изучении относительного движения. Поэтому представляется принципиально ошибочным, что сила инерции в ряде случаев описывается как сила, которая собственно уплотняет смесь. Поскольку инерция не может быть силой, вызывающей ускорение, она не может быть уплотняющей.

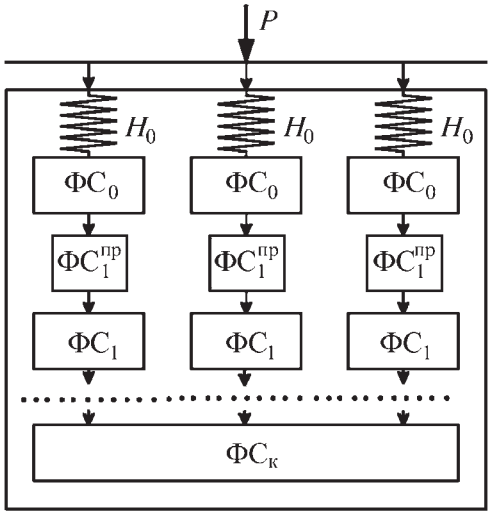


Рис. 2. Схема поэтапного изменения ФС

Конечно, на всех этапах технологического цикла (подготовка формовочных материалов и отработанной смеси; смесеприготовление; дозировка, т.е. наполнение опоки; уплотнение; заливка; охлаждение отливки в форме; выбивка, включая транспортные операции) ФС подвергается первичным и вторичным механическим воздействиям, что приводит к изменению надмолекулярной организации смеси, прочности, диэлектрических свойств, адсорбционных и каталитических свойств, плотности, вязкости, поверхностной активности и т.д., а также проявлению адгезии и когезии.

Эти явления связаны с тем, что собственно механическое воздействие сопровождается явлениями немеханической природы: электронной эмиссией, явлениями двойного электрического слоя, образованием статического электричества, выделением тепла, тиксотропией и др. Поведение ФС, в первую очередь при уплотнении, определяется зависимостями между напряжениями и деформациями и их производными по времени.

В целом такое поведение ФС наиболее объективно характеризуется реологическими моделями.

В настоящее время практически не возникает вопрос – является ли ФПГС реологическим телом. Хотя собственно предмета обсуждения не было, положительный ответ был само собой разумеющимся для любого серьезного исследователя. Но если это так, то метод реологических моделей также должен быть само собой разумеющимся и при изучении смеси. Однако до сих пор в этом нет единства. Любая реологическая модель, предложенная тем или иным исследователем, в первую очередь, подвергается не просто критике, а обструкции, начиная с традиционного заявления типа: "А что эта модель даст цеховому технологу или мастеру формовки?". А дает это цеховому технологу в

* Зачастую так называемые "новые способы уплотнения" – всего лишь попытка производителей формовочного оборудования завоевать, хотя бы на время, рынок.

конкретной ситуации любое теоретическое исследование обобщенного характера? Но если мы хотим установить механизм уплотнения ФПГС, если хотим серьезно изучить смесь и ее поведение в различные периоды ее оборота, то исследования смеси как реологического тела обязательны.

Главная задача, стоящая перед авторами реологических моделей ФПГС, заключается в объединении нескольких моделей смеси. Эта задача вытекает из того, что смесь, как реологическое тело, меняет свои характеристики на этапах от сыпучей после смесеприготовления до уплотненной после формовки. Принципиально изменяются вязкость, пластичность, упругость и характеризующие их модули и коэффициенты.

Метод реологических моделей является классическим в теории линейной упруговязкости. Комбинируя более двух реологических элементов или присоединяя к модели, состоящей из двух таких элементов, можно получить структурную реологическую модель для тела, обладающего сочетанием упругих, вязких и пластических характеристик. Три идеальных модели, таким образом, можно соединять в различных сочетаниях, которые будут описывать различные проявления упруговязких и пластических свойств тела.

Соединение идеальных моделей может быть последовательное (–) и параллельное (‖), что характеризует проявление различных свойств при нагружении данного тела в последовательности, определенной реологической моделью.

Достаточно подробно реологические модели, в том числе с точки зрения механизма уплотнения в микро- и макрообъеме, рассмотрены во многих работах. Но они не дают полного ответа на вопрос: благодаря чему нагружение ФПГС различными методами позволяет получить уплотненную форму с необходимыми свойствами.

Собственно модель включает комбинации параллельно и последовательно соединенных элементов: упругих Гука *H*, вязких Ньютона *N* и пластичных Сен-Венана *S*.

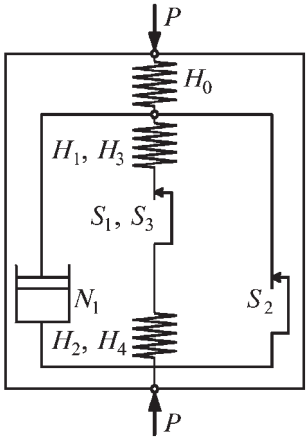
При этом, в процессе уплотнения и после него, значения, характеризующие как сами элементы, так связи между ними, меняются.

Проведенные исследования показывают, что наиболее полно такое сложное реологическое тело, как формовочная песчано-глинистая смесь, можно описать только с помощью комбинации параллельно-последовательного и последовательно-параллельного соединений элементов *H, N, S*.

Ошибочными являются представления, что при различных способах нагружения ФПГС представляет собой разные реологические модели. Реологическая модель едина, но различные связи и составляющие могут работать по-разному, при этом первоначальное состояние смеси как малоуплотненного и конечное как тела формы во всех случаях одинаково.

Пока в ФС есть увлажненная глина, она остается упруговязкопластичной, но с разным соотношением

Рис. 3. Структурная реологическая модель уплотнения ФС



H-N-S. Несомненно, что способ уплотнения (метод приложения внешней нагрузки) определяет особенности уплотнения, но вне зависимости от того, каким образом достигается эффект, он сопровождается указанным выше переходом к уплотненному состоянию с удалением внутрипорового воздуха. И при всем соблазне, что различные способы уплотнения предполагают разные реологические модели, это не может соответствовать действительности.

Анализ уплотнения ФС показывает, что независимо от метода уплотнения, процесс деформирования смеси во времени условно можно разбить на два этапа: уплотнение до заполнения пор (допредельная область) и уплотнение после заполнения пор (запредельная область).

На рис. 3 предлагается структурная реологическая модель уплотнения, учитывающая деформирование смеси на каждом этапе, где H_0 ,..., H_4 – упругие элементы Гука; *N* – элемент Ньютона, характеризующий структурную вязкость смеси; S_1 ,..., S_3 – элементы Сен-Венана, характеризующие пластические свойства смеси; H_0 – характеризует мгновенную упругую деформацию смеси; H_1, H_3 – характеризуют структурную упругость оболочки связующего; H_2, H_4 – характеризуют структурную упругость кварцевой основы смеси (песка).

Элементы H_0, H_1, H_2, H_3, H_4 – являются переменными функциями и зависят от числа контактов, гранул, зерен, агрегатов, т.е. функциями степени уплотнения.

Тело Прандтля Pr = *H* – *S*, таким образом, характеризует свойства глинистого связующего.

Качественно механизм уплотнения формовочной смеси при нагружении можно описать следующим образом. В допредельной области деформирование идет по схеме

$$\text{ФС}^{\leq \text{пр}} = H_{\sum 1} - (N \| S_1 \| S_2),$$

где ФС – условное обозначение процесса деформирования формовочной смеси; индекс "пр" обозначает "предельное"; $H_{\sum 1} = H_0 - H_1 - H_2$, т.е. все упругие элементы реологической модели на первом этапе

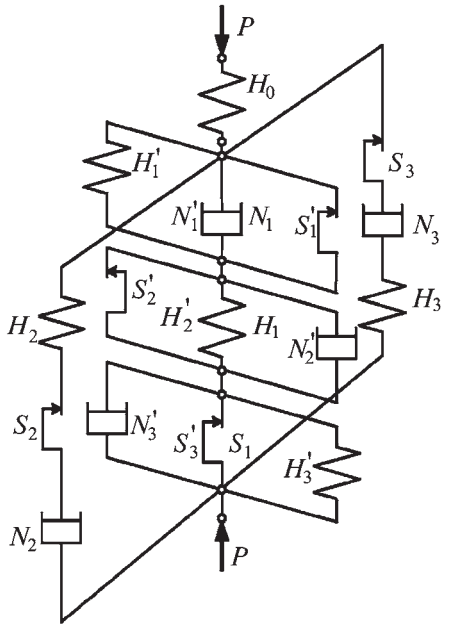


Рис. 4. Объемная комбинация связей

деформирования суммируются, так как находятся в состоянии предельного сжатия. Это объясняется кратковременностью (импульсом) нагружения. Все упругие элементы (H_0, H_1, H_3) работают как один элемент $H_{\sum 1}$.

Таким образом, с упругим элементом $H_{\sum 1}$ работает одновременно группа параллельно соединенных элементов: вязкого N, пластических S_1 и S_2, характеризующих собой вязкопластическое течение тела Бингама $B = S \| N$. Подобное течение в смеси при низких скоростях нагружения происходит периодически и кратковременно, кривая деформации имеет слегка волнистый характер, что не наблюдается при высоких скоростях деформаций.

В запредельной области деформирование идет по схеме:

$$ФС^{\geq пр} = H_{\sum 2} - S_3,$$

где $H_{\sum 2} = H_3 - H_4$, это означает, что упругие деформации оболочек связующего и кварцевой основы наступают одновременно, но последовательно с пластическими деформациями.

Однако такая модель характеризует поведение смеси только при динамическом нагружении и достаточно высоких скоростях деформации и не объясняет всех процессов, происходящих в ФС на различных этапах технологического цикла.

Поэтому очевидно, что необходима модель, рассматривающая ФС в динамике всех происходящих в ней процессов. Такую модель можно представить только как объемную комбинацию связей (рис. 4), представляющих собой структуры параллельно-последовательного соединения

$$ФС_М = (H_1^1 \| N_1^1 \| S_1^1) - (S_2^1 \| H_2^1 \| N_2^1) - (N_3^1 \| S_3^1 \| H_3^1)$$

и последовательно-параллельного соединения

$$ФС_М = (H_2 - S_2 - N_2) \| (N_1 - H_1 - S_1) \| (S_3 - N_3 - H_3),$$

т.е.

$$ФС_М = H_0 - \left\{ \left[(H_1^1 \| N_1^1 \| S_1^1) - (S_2^1 \| H_2^1 \| N_2^1) - (N_3^1 \| S_3^1 \| H_3^1) \right] \times \right.$$
$$\left. \times [(H_2 - S_2 - N_2) \| (N_1 - H_1 - S_1) \| (S_3 - N_3 - H_3)] \right\}.$$

Такая реологическая модель ФПГС позволяет определить поведение ФС в любых условиях и показывает, как при уплотнении изменяются вязкость, пластичность и упругость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Киян Э.Ф., Резчиков Е.А., Чуносов А.Э**. Эмпирические уравнения исследования статистического и динамического уплотнения литейных форм // Конструирование, исследование, технология и экономия производства автомобиля. М.: НИИ стандартавтосельхозмаш, 1991. С. 147–156.

2. **Резчиков Е.А.** Моделирование процесса уплотнения формовочной смеси / Современные технологии в машиностроении: сб. научн. статей. Пенза: ПДНТИ, 2003. С. 43–45.

3. **Формовочные** материалы и смеси / С.П. Дорошенко, В.П. Авдокушин, К. Русин, И. Мацашек. Киев: Высш. шк., 1990. Прага: СНТЛ, 1990. 415 с.

Евгений Алексеевич Резчиков, канд. техн. наук

УДК 669.5:629.113/115

М.А. Гуреева *(ОАО НПО "ЦНИИТМАШ", Москва)*, **О.Е. Грушко** *(ФГУП "ВИАМ", Москва)*, **В.В. Овчинников** *(ОАО "Российская самолетостроительная корпорация "МиГ", Москва)*

Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств

Приведен аналитический обзор по вопросу эффективности применения алюминиевых сплавов в конструкции современных транспортных средств в России и за рубежом. Сформулированы требования к структуре и свойствам полуфабрикатов алюминиевых сплавов. Представлены результаты исследований по получению листов из сплава АВ с мелкозернистой рекристаллизованной структурой для наружных панелей автомобилей, параметрами технологичности и механическими свойствами на уровне стального листа, получаемыми при старении в процессе сушки лакокрасочного покрытия.

Is given instant analysis regarding the effectiveness of the application of aluminum alloys in the construction of contemporary transportation means in Russia and abroad. Requirements for the structure and the properties of the semifinished products of aluminum alloys are formulated. Are represented the results of studies on obtaining of sheets from the alloy AV with the fine-grained recrystallized structure for the external panels of automobiles, the parameters of technological effectiveness and the mechanical properties at the level of steel plate, obtained during the aging in the process of the drying of paint and varnish coat.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; системы легирования; механические свойства; штампуемость; свариваемость; сварные узлы из алюминиевых сплавов.

Key words: aluminum alloys; the system of alloying; mechanical properties; stampability; weldability; weldments from the aluminum alloys.

Многолетняя практика применения свариваемых сплавов в авиакосмической технике является практической основой по применению их в других отраслях народного хозяйства. Большинство свариваемых алюминиевых сплавов включены в государственные стандарты. Марки алюминиевых деформируемых сплавов России и США, их свариваемость и вид полуфабрикатов приведены в табл. 1.

Авиакосмическая техника. На современном этапе развития дозвуковой и сверхзвуковой авиации алюминиевые сплавы являются основными конструкционными материалами в самолетостроении. Отдельные элементы конструкции изготовляются из стали, титана или композиционного материала, что повышает надежность и работоспособность конструкции в целом. Выбор сплава для конструкции осуществляется на основе дифференцированного подхода к работе каждого узла с учетом его ресурса, эксплуатационных нагрузок, возможности нагрева и других требований к деталям.

Современная авиационная техника — это техника с многоразовой и длительной эксплуатацией (30000... 60000 летных часов). Ее изделия находятся под воздействием циклических нагрузок, температуры и атмосферной среды.

В России при изготовлении авиационной техники успешно используются упрочняемые термической обработкой высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu и сплавы средней и повышенной прочности системы Al–Mg–Cu. Они являются конструкционным материалом для обшивки и внутреннего силового набора элементов планера самолета (фюзеляж, крыло, киль и др.). Свариваемые алюминиевые сплавы систем A1–Mn, A1–Mg, Al–Cu, Al–Mg–Li, Al–Mg–Si применяют для изготовления планера, бортовых систем, шасси, лопастей воздушного винта, приборов и элементов внутренней отделки салона.

При изготовлении гидросамолетов предусмотрено использование свариваемых коррозионно-стойких магналиевых сплавов (АМг5, АМг6) и сплавов системы A1–Zn–Mg (1915, В92). Планер легкого самолета (фюзеляж, крылья и хвостовое оперение), как правило, изготовляется из алюминиевого сплава Д16; детали конструкции (стрингеры, лонжероны, шпангоуты и др.) – из прессованных профилей Д16 и В95.

Развитие авиационной техники неразрывно связано с решением задачи по снижению массы летательного аппарата. Для снижения собственной массы летательных аппаратов применяются алюминиево-литиевые сплавы основных систем легирования Al–Mg–Li (1420, 1421, 1424) и Al–Cu–Li (1460, 1464, 1469). За рубежом для изготовления летательных аппаратов аналогичного назначения применяют сплавы 2090 и 8090 и их модификации [1].

Несущие топливные баки собирают по каркасно-панельной схеме (МиГ-29) и панельной схеме (Су-27). В первом случае топливный бак имеет силовой каркас, состоящий из поперечных силовых элементов (шпангоутов) и балок (продольные силовые элементы) (рис. 1). Как правило, шпангоуты состоят из несколь-

1. Марки алюминиевых деформируемых сплавов России и США, их свариваемость и вид полуфабрикатов

Система, серия	Страна	Марка сплава	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		$\sigma_в$, МПа	Полуфабрикат						
				Дуговая сварка	Контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
Сплавы термически неупрочняемые. Состояние отожженное													
Al	РФ	АД1	99,3 Al	А	А	80	+	+	–	+	+	+	+
lxxx	США	1145	99,45 Al	А	В	75	+	–	–	–	–	–	–
		1060	99,6 Al	А	В	70	+	+	–	–	+	+	+
		1100	99,0 Al	А	А	90	+	+	+	+	+	+	+
Al–Mn	РФ	АМц	Al; 1,3 Mn	А	А	120	+	+	–	+	+	+	+
2xxx	США	2014	Al; 4,4 Cu; 0,5 Mg; 0,8 Mn; 0,8 Si	С	А	485	+	+	+	+	+	+	+
		2017	Al; 4,0 Cu; 0,6 Mg; 0,7 Mn; 0,5 Si	С	А	425	–	–	–	+	–	–	+
		2024	Al; 4,5 Cu; 1,5 Mg; 0,6 Mn	С	А	485	+	+	+	+	+	+	+
		2218	Al; 4,0 Cu; 1,5 Mg; 2,0 Ni	С	А	330	–	–	+	–	–	–	–
		2219	Al; 6,2 Cu; 0,3 Mn	А	А	420	+	+	–	+	+	+	+
		2618	Al; 2,3 Cu; 1,6 Mg; 1,1 Ni; 1,1 Fe	С	А	430	–	–	+	–	–	–	–
Al–Mg–Si	РФ	АД31	Al; 0,6 Mg; 0,5 Si	Б	Б	240	–	–	–	+	+	–	–
		АД33	Al; 1,1 Mg; 1,0 Si; 0,25 Cu	Б	Б	310	–	–	–	+	+	–	–
		АД35	Al; 1,1 Mg; 1,0 Si; 0,7 Mn	Б	Б	320	+	+	+	+	+	–	–
		АВ	Al; 1,0 Mg; 0,85 Si; 0,25 Mn	А	А	320	+	+	+	+	+	+	–
6xxx	США	6061	Al; 1,0 Mg; 0,6 Si; 0,2 Cr; 0,25 Mn	А	А	310	+	+	+	+	+	+	+
		6063	Al; 0,7 Mg; 0,4 Si	А	А	240	–	–	+	–	+	+	–
		6070	Al; 0,80 Mg; 1,35 Si; 0,7 Mn; 0,27 Cu	А	А	380	–	–	–	–	+	+	–
		6101	Al; 0,6 Mg; 0,5 Si	А	А	220	–	–	–	+	+	+	–
		6201	Al; 0,8 Mg; 0,7 Si	А	А	330	–	–	–	+	–	–	+
		6951	Al; 0,6 Mg; 0,35 Si; 0,25 Cu	А	А	270	+	+	–	+	–	+	+
Al–Zn–Mg–Cu; Al–Zn–Mg	РФ	В92	Al; 3,2 Zn; 4,4 Mg; 0,8 Mn	Б	Б	420	+	+	+	–	–	–	–
		1915	Al; 3,7 Zn; 1,1 Mg; 0,4 Mn	Б	Б	380	+	–	–	–	+	+	–

Система, серия	Страна	Марка сплава	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		$\sigma_в$, МПа	Полуфабрикат						
				Дуговая сварка	Контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
Al–Zn–Mg–Cu; Al–Zn–Mg	РФ	В95	Al; 6,0 Zn; 4,3 Mg; 1,7 Cu	Д	А	520	+	+	+	+	+	+	–
		В96ц	Al; 8,5 Zn; 2,6 Mg; 2,3 Cu	Д	А	600	–	–	+	–	–	–	–
7xxx	США	7005	Al; 4,5 Zn; 1,4 Mg; 0,45 Mn; 0,13 Cr	А	А	350	+	–	–	–	–	–	–
		7075	Al; 5,6 Zn; 2,5 Mg; 1,6 Cu; 0,2 Cr	С	А	570	+	+	+	+	+	+	+
		7475	Al; 5,7 Zn; 2,2 Mg; 1,6 Cu	–	–	505	+	+	–	–	–	–	–
		7178	Al; 6,8 Zn; 2,7 Mg; 2,0 Cu; 0,2 Cr	С	А	605	+	+	+	+	+	+	+
3xxx	США	3003	Al; 1,2 Mn; 0,12 Mg	А	А	110	+	+	+	+	+	+	+
		3004	Al; 1,2 Mn; 1,0 Mg	А	А	180	+	+	+	–	–	+	–
Al–Mg	РФ	АМг1	Al; 1,1 Mg	Б	А	120	+	–	–	–	+	–	–
		АМг2	Al; 2,2 Mg; 0,4 Mn	Б	А	190	+	+	+	+	+	+	+
		АМг3	Al; 3,5 Mg; 0,6 Mn; 0,6 Si	А	А	220	+	+	+	+	+	+	–
		АМг4	Al; 4,3 Mg; 0,6 Mn	А	А	280	+	–	–	+	–	–	–
		АМг5	Al; 5,3 Mg; 0,6 Mn	А	А	300	+	+	+	+	+	+	–
		АМг6	Al; 6,3 Mg; 0,6 Mn	А	А	340	+	+	+	+	+	+	–
5xxx	США	5005	Al; 0,8 Mg	А	А	125	+	+	–	+	–	–	+
		5050	Al; 1,4 Mg	А	А	145	+	+	–	–	–	+	–
		5052	Al; 2,5 Mg; 0,25 Cr	А	А	195	+	+	–	+	–	+	+
		5083	Al; 4,4 Mg; 0,7 Mn; 0,15 Cr	А	А	290	+	+	–	–	+	+	–
		5086	Al; 4,0 Mg; 0,45 Mn; 0,1 Cr	А	А	260	+	+	+	–	+	+	–
		5154	Al; 3,5 Mg; 0,25 Cr	А	А	240	+	+	–	+	+	+	+
		5252	Al; 2,5 Mg	А	А	180	+	+	–	–	–	–	–
		5454	Al; 2,8 Mg; 0,80 Mn; 0,1 Cr	А	А	250	+	+	–	–	+	+	–
		5456	Al; 5,2 Mg; 0,80 Mn; 0,1 Cr	А	А	310	+	+	–	–	+	–	–
		5457	Al; 1,0 Mg; 0,30 Mn	А	А	130	+	+	–	–	–	–	–
		5657	Al; 0,8 Mg; 0,30 Mn	А	А	110	+	–	–	–	–	–	–

Система, серия	Страна	Марка сплава	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		$\sigma_в$, МПа	Полуфабрикат						
				Дуговая сварка	Контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
Сплавы термически упрочняемые. Состояние: закалка + старение													
Al–Mg–Cu, Al–Cu–Mn	РФ	Д20	Al; 6,5 Cu; 0,6 Mn	Б	Б	400	+	+	+	+	+	–	–
		1201	Al; 6,3 Cu; 0,3 Mn	А	Б	430	+	+	+	+	+	+	+
		ВАД1	Al; 4,1 Cu; 2,5 Mg; 0,6 Mn	Б	А	430	–	–	+	+	–	–	–
		Д1	Al; 4,1 Cu; 0,6 Mg; 0,6 Mn	Д	А	370	+	+	+	+	+	+	–
		Д16	Al; 4,3 Cu; 1,0 Mg; 0,6 Mn	Д	А	465	+	+	–	+	+	+	–
		Д19	Al; 4,0 Cu; 2,0 Mg; 0,75 Mn	Д	А	430	+	+	–	+	+	–	–
Al–Mg–Si–Cu	РФ	АК6	Al; 0,6 Mg; 0,9 Si; 2,2 Cu; 0,6 Mn	Д	–	420	–	–	+	+	–	+	–
		АК8	Al; 0,6 Mg; 0,9 Si; 4,3 Cu; 0,7 Mn	Д	–	460	–	–	+	+	–	–	–
Al–Cu–Mg–Fe–Ni	РФ	АК4	Al; 2,2 Cu; 1,6 Mg; 1,2 Fe; 1,3 Ni	Д	–	400	–	–	+	+	–	–	–
		АК4-1	Al; 2,2 Cu; 1,6 Mg; 1,2 Fe; 1,2 Ni	Д	–	400	+	+	+	+	+	+	–

Примечание. А – хорошая свариваемость; Б – удовлетворительная свариваемость, требуется разработка специальной технологии; В – свариваемый сплав во многих случаях, однако требуется специальная технология; С – ограниченная свариваемость; Д – сварка не рекомендуется.

ких отдельных заготовок, которые свариваются электронно-лучевой сваркой. Шпангоуты с балками соединяют в единый силовой каркас ручной аргонодуговой сваркой. Для создания герметичного объема топливного бака и его аэродинамической формы проемы каркаса фрезеруют и приваривают к ним панели на установках с ЧПУ типа УПСФ. При панельной схеме сборки топливных баков в первую очередь изготовляют панели, которые затем через стыковочные узлы объединяются в герметичную конструкцию.

а) *б)*

Рис. 1. Шпангоут (*а*) из сплава 1420 и каркас топливного бака № 1-2 (*б*) самолета МиГ-29К

Применение высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов в сварных герметичных конструкциях несущих топливных баков фюзеляжа позволяет снизить их собственную массу на 12...15 %. Химический состав и механические свойства современных свариваемых алюминиево-литиевых сплавов в искусственно состаренном состоянии приведены в табл. 2 и 3.

Все сплавы этой группы (см. табл. 2 и 3) являются тер-

2. Современные алюминиево-литиевые сплавы [2–10]

Марка сплава	Содержание элементов, % мас.								
	Li	Cu	Mn	Mg	Sc	Ag	Cr	Zr	Ti
1420	1,8...2,2	–	0,1...0,25	5,8...6,2	–	–	–	0,1	–
1421	1,7...2,2	–	0,1...0,2	5,6...6,1	0,15...0,35	–	–	0,1	–
1423	1,7...2,0	–	0,1...0,2	3,5...4,4	0,08...0,12	–	–	0,1	–
1424	1,5...1,8	–	0,1...0,25	4,7...5,1	0,05...0,08	–	–	0,05...0,10	0,005...0,20
5091	1,2...1,4	–	–	3,7...4,2	–	–	–	–	–
1440	1,6...2,3	1,2...1,9	0,05...0,08	0,60...1,10	–	–	–	0,10...0,20	0,02...0,10
1441	1,7...2,0	1,6...1,9	0,01...0,40	0,7...1,1	–	–	–	0,04...0,16	0,01...0,07
1450	1,8...2,0	2,8...3,2	0,05...0,08	0,05...0,10	–	–	–	0,10...0,20	0,10...0,15
1460	1,9...2,3	2,6...3,3	0,05...0,10	0,05...0,10	–	–	–	0,08...0,12	0,10...0,15
1460-1	1,0...1,3	5,0...5,5	0,08...0,10	0,02...0,07	–	–	–	0,08...0,10	0,02...0,10
1460-2	1,0...1,2	4,0...4,3	0,20...0,30	0,02...0,07	–	–	–	0,10...0,16	0,04...0,06
1460-3	1,2...1,4	5,0...6,0	0,08...0,12	0,05...0,08	–	–	–	0,10...0,12	0,05...0,10
1461	1,5...1,8	2,8...3,5	0,1...0,5	0,1...0,6	0,4...0,8 Zn	–	0,02...0,05	0,05...0,12	0,02...0,05
1464	1,6...1,8	3,0...3,2	0,2...0,4	0,4...0,7	0,05...0,09	–	–	0,08...0,11	–
1469	1,0...1,7	3,2...4,5	0,003...0,5	0,01...0,5	0,02...0,28	0,15...1,5	–	0,02...0,25	–
2090	1,9...2,6	2,4...3,0	0,05...0,07	0,20...0,30	–	–	0,05	0,10	0,15
2091	1,7...2,3	1,8...2,5	0,1...0,15	1,1...1,9	–	–	0,10...0,12	0,10	0,10
2094	0,7...1,4	4,4...5,2	0,25	0,25...0,80	–	0,25...0,60	–	0,12	0,10

3. Типичные механические свойства алюминиево-литиевых сплавов при температуре испытаний 20 °С [2–10]

Марка сплава	Плотность, кг/м^3	E, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
1420	2470	–	445	240	11,0
1421	2460	–	465	335	11,0
1423	2480	–	420	245	12,0
1440	2550	7300	450	340	8
1450	2600	7550	550	470	6
1460	2600	7550	560	480	6
1460-1	2700	7600	600	530	5
1460-2	2665	7500	580	500	5,5
1460-3	2700	7550	610	540	5,3
2090	2590	7600	580	515	6
8090	2560	7700	440	340	10
Weldalite 049	2710	7790	590	540	6

мически упрочняемыми и характеризуются сравнительно высоким уровнем механических свойств. Сплавы 1420, 1424, 1440, 1441, 1460, 1464 и 1469 отличаются от других алюминиево-литиевых сплавов возможностью удовлетворительной сварки.

За рубежом и в России разрабатываются алюминий-литиевые сплавы нового поколения, дополнительно легированные серебром, скандием и другими микродобавками. Сплав 2195, содержащий серебро, применяется для изготовления топливных баков ТКА, обеспечивая около 13 % снижения массы по сравнению с ранее применявшимся сплавом 2219. Существуют предположительные сведения об использовании сплавов 2096, 2097 в конструкции военных самолетов вместо сплава 2124.

В России разработан и проходит всесторонние испытания сплав В-1469 на основе системы Al–Cu–Li–Mg, легированный серебром, циркони-

ем и скандием. Сплав защищен патентом и имеет зарубежные аналоги – сплавы 2195 и 2098, химические составы которых внесены в международный стандарт. Средний состав сплава В-1469, % мас.: 4,3 Cu; 0,35 Mg; 1,0 Li; 0,44 Ag; 0,12 Zr; 0,1 Sc.

Кроме несущих топливных баков в конструкциях современных истребителей для увеличения времени и дальности полета используются подфюзеляжные и крыльевые подвесные топливные баки. Конструктивно подвесные топливные баки выполнены сварными, состоящими из набора диафрагм и обшивки. При изготовлении подвесных баков применяются сплавы системы Al–Mg (АМг2, АМг4, АМг6 и 1570) толщиной 3...5 мм.

Сплавы АМц, АМг3, АМг5 служат материалом для топливных и масляных баков, бачков гидросистем, трубопроводов. В арматуре гидравлических систем используются сплавы АМц, АВ и АД33.

Наряду с крупными конструктивными элементами в современных летательных аппаратах в большом количестве применяются различные сосуды, бачки и баллоны, работающие под внутренним давлением. К таким изделиям можно отнести топливные аккумуляторы, компенсаторы падения давления в топливной системе и системе кондиционирования (кабины пилота или салона), расширительные бачки, накладные топливные баки и трубопроводы.

По типу конструктивного оформления сосуды и баллоны из алюминиевых сплавов, работающие под внутренним давлением, можно разделить на сферические, цилиндрические и тороидальные. При изготовлении баллонов и сосудов из алюминиевых сплавов применяются сплавы АМг2 и АМг4 толщиной 3...4 мм. Основными операциями при изготовлении баллонов являются холодное деформирование листовых заготовок и сварка плавлением (чаще ручная аргонодуговая сварка).

Похожие конструкции узлов из алюминиевых сплавов находят широкое применение при разработке и изготовлении пассажирских самолетов, как широкофюзеляжных и дальнемагистральных, так и для внутренних линий (RRJ, Ил-114, Ту-330, С-80 и др.). В пассажирских самолетах листы и панели из алюминиевых сплавов применяют в системе кондиционирования салона, внутренней отделки интерьера, пассажирских кресел, элементов приборных досок и узлов крепления навигационного оборудования.

В конструкции самолетов гражданского флота используют в основном сплавы Д16, Д19, В95, В96 в качестве материалов для фюзеляжа, крыла и киля. Обшивка верхней поверхности крыла выполняется из сплавов типа В95, хорошо работающих на сжатие. Детали растянутой зоны крыла и обшивка фюзеляжа, вспомогательные лонжероны и нервюры изготовляются из высокопрочного сплава типа Д16 и его аналогов.

Лонжероны и шпангоуты фюзеляжа выполняют из сплавов Д16, В95. Эти сплавы рекомендуются для силовых деталей, которые воспринимают большие эксплуатационные нагрузки. Прессованные полуфабрикаты из сплавов В95 и В96 поступают на изготовление киля крупногабаритных самолетов. Обшивка в зоне двигателя, подвергающаяся нагреву, в основном изготовляется из сплавов Д16, Д19.

В авиации США широко применяются сплавы серий 2ххх, 3ххх, 5ххх, 6ххх и 7ххх. Серия 2ххх рекомендована для работы при высоких рабочих температурах и с повышенными значениями коэффициента вязкости разрушения. Сплавы серии 7ххх — для работы при более низких температурах значительно нагруженных деталей и для деталей с высокой сопротивляемостью к коррозии под напряжением. Для малонагруженных узлов, в гидро-, масло- и топливных системах применяются сплавы серий 3ххх, 5ххх и 6ххх.

В конструкциях транспортных самолетов США широко применяют сплавы серий 2ххх, 1ххх (2024, 2014, 7075 и 7178) при изготовлении фюзеляжа, крыльев, киля и внутреннего силового набора (лонжероны, нервюры, шпангоуты и др.).

Сжатые зоны крыла, фюзеляжа, обшивка и силовые элементы выполняются из сплавов 7075, 7475 и 7178. Для деталей крыла, работающих на растяжение, отдают предпочтение сплавам 2014, 2024.

Анализ конструкций проектируемых самолетов на период до 2025 г. показывает, что объем применения алюминиевых сплавов не проявляет тенденции к заметному снижению, несмотря на рост использования композиционных материалов.

При создании объектов космической техники бесспорное преимущество имеют алюминиевые сплавы. Высокие значения удельной прочности, удельной жесткости материала позволили обеспечить изготовление баков, межбаковых и носовых частей ракеты с высокой продольной устойчивостью. К преимуществам алюминиевых сплавов (2219 и др.) следует отнести их работоспособность при криогенных температурах в контакте с жидким кислородом, водородом и гелием. У этих сплавов происходит так называемое криогенное упрочнение, т.е. прочность и пластичность параллельно растут с понижением температуры.

Судостроение. Алюминий и сплавы на его основе находят все более широкое применение в судостроении. Из алюминиевых сплавов изготовляют корпусы судов, палубные надстройки, коммуникацию и различного рода судовое оборудование.

Основное преимущество при внедрении алюминия и его сплавов по сравнению со сталью — снижение массы судов, которая может достигать 50...60 %. В результате представляется возможность повысить грузоподъемность судна или улучшить его тактико-технические характеристики (маневренность, скорость и т.д.).

Предпочтительность применения алюминия в судостроении подтверждается его высокой коррозионной стойкостью и удовлетворительной сопротивляемостью к ударным нагрузкам. Первостепенное значе-

ние для судостроения приобретает возможность изготовления конструкции из алюминиевых сплавов в сварном варианте.

Для изготовления конструкций речного и морского флота наиболее широко применяют магналиевые сплавы АМг3, АМг5, АМг61, а также сплавы АМц и Д16. Корпус судна повышенной грузоподъемности изготовляют из стали, а надстройки и другое вспомогательное оборудование — из алюминиевых сплавов. Рыболовецкие баркасы изготовляют из сплава АМг5 (обшивка).

В судостроении США широко используют свариваемые сплавы серий 5ххх и 6ххх. Там, где необходима высокая прочность (~ 500 МПа), применяются полуфабрикаты из сплавов серий 2ххх и 1ххх. Для корпусов небольших лодок обычно используют 5052 или 6061, для более крупных судов — из сплава 5086. Из данного сплава изготовляют перегородки, топливные баки, кабины. Находят применение сплавы 5052, 5086 и 6061 в конструкциях парусных судов (корпус, мачты и др.); основным материалом при изготовлении рыболовных судов является сплав 5086.

При изготовлении судов военно-морского флота США используются коррозионно-стойкие деформируемые сплавы 5052, 5086, 6061. В конструкциях эскадренных миноносцев затрачивается около 6000 т алюминиевого сплава 5456; при изготовлении отдельных сварных элементов в конструкции авианосца – около 2000 т.

Железнодорожный транспорт. Тяжелые условия эксплуатации подвижного состава железной дороги (длительный срок службы и способность выдерживать ударные нагрузки) предъявляют особые требования к конструкционным материалам.

Основным конструкционным материалом для изготовления кузовов пассажирских вагонов в нашей стране и за рубежом является низкоуглеродистая сталь. Это обусловлено низкой стоимостью полуфабрикатов из стали и ее хорошей свариваемостью при дуговой и контактной сварке.

Однако, начиная с 1975–1985 гг. цены на полуфабрикаты из алюминиевых сплавов были заметно снижены, и алюминиевые полуфабрикаты перестали быть дефицитными. Во многих странах мира (Швейцарии, ФРГ, Франции, Японии и др.) начались широкие исследования по применению алюминиевых сплавов в конструкции кузовов пассажирских вагонов (включая вагоны метро и скоростные поезда) в целях уменьшения массы, снижения стоимости изготовления и значительного повышения срока эксплуатации.

Наибольших успехов в конструировании и производстве сварных кузовов вагонов из алюминиевых сплавов добились в Швейцарии, Японии и ФРГ. К настоящему времени достигнут гигантский прогресс в производстве таких кузовов. Если в период 1960–1970 гг. доля пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов составляла 1–2 %, то в 1995 г. – 50 %, а в 1999 г. – до 80 % от всего объема выпуска вагонов. В настоящее время за рубежом успешно эксплуатируются более 20 тыс. пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов [11].

В России работы по производству кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов начались в период 1965–1970 гг. Был построен опытный электропоезд ЭР-200, который несколько лет эксплуатировался на магистрали Москва–Санкт-Петербург. В настоящее время заканчивается строительство экспериментального поезда с вагонами из алюминиевых сплавов под условным названием “Сокол”. Однако на сегодня серийное производство сварных кузовов вагонов из алюминиевых сплавов в нашей стране отсутствует, а число построенных опытных вагонов не превышает 25–30.

Значительный интерес представляет выбор марки алюминиевых сплавов для кузова пассажирских вагонов. За рубежом в период до 1980–1985 гг. в основном применяли сплавы системы Al–Zn–Mg (например, 2020), а с 1985–1995 гг. – сплавы системы Al–Mg–Si (например, 6005, 6005А, 6013, 6061 и др.). Переход на эти сплавы был связан только с их отличной прессуемостью и высокой коррозионной стойкостью, несмотря на определенное снижение прочности. В России до настоящего времени в основном применяют сплавы системы Al–Zn–Mg (например, 1915) [12].

Для объективной оценки конструктивно-технологической схемы кузова пассажирского вагона из алюминиевых сплавов необходимо рассмотреть изменения в конструкции вагонов. За рубежом, как правило, применяли каркасную конструкцию, т.е. набор продольных и поперечных жесткостей, к которым крепили листовую обшивку в основном с помощью контактной и дуговой сварки (ручной и механизированной). В нашей стране эта конструктивно-технологическая схема является основной и единственной.

В последние годы за рубежом ряд фирм разработали и освоили в серийном производстве технологию изготовления крупногабаритных прессованных полых панелей длиной до 24...26 м и шириной 0,55...0,75 м. Ширина прессованных панелей определяется только силой и размерами рабочего пространства прессов. Предполагается, что при увеличении силы прессов до 150...300 МН принципиально возможно изготовление полых панелей шириной до 1,2...1,6 м.

На основе достижений в области производства полых панелей за рубежом разработана принципиально новая конструктивно-технологическая схема изготовления кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов. Весь кузов вагона сварен из длинномерных полых панелей только продольными швами без поперечных стыков и каких-либо дополнительных продольных и поперечных жесткостей. По данным зарубежных источников, трудоемкость изготовления кузова вагона из таких панелей в 2–3 раза меньше, чем для традиционной каркасно-панельной схемы изготовления.

С учетом отечественного и зарубежного опыта наиболее оптимальны следующие геометрические размеры кузова вагона из алюминиевых сплавов: дли-

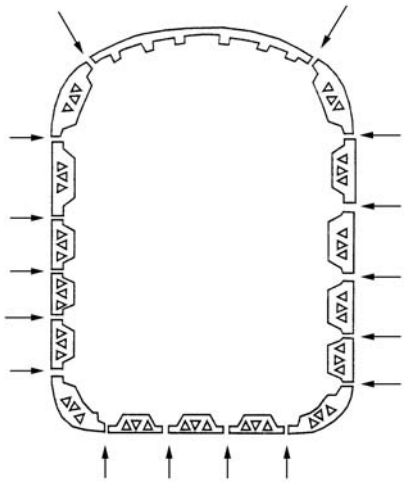


Рис. 2. Конструктивно-технологическое членение кузова вагона из прессованных полых панелей (стрелками отмечены места сварки продольных швов)

на 22...24 м; ширина 3,4...3,6 м; расстояние между осями шкворней 15...16 м. Для организации массового производства кузовов вагонов с такими геометрическими размерами наиболее рационально применение только панельной конструкции (без продольного и поперечного силового наборов). Принципиальное членение кузова приведено на рис. 2. Основными подсборками являются левая и правая боковые стенки, нижняя рама с полом, крыша и торцовые стенки [11].

Боковые стенки кузова вагона рационально изготовлять из трех-четырех прессованных полых панелей длиной 22...24 м, сборку-сварку всех продольных швов выполнять только в нижнем положении с применением мощной системы растяжителей вдоль стыка и подвижного локального прижима.

Принципиально возможна сварка плавящимся электродом постоянным током обратной полярности и неплавящимся вольфрамовым электродом с присадочной проволокой или без нее переменным синусоидальным током или с прямоугольными разнополярными импульсами. Перспективной является сварка без присадочной проволоки с использованием материала прессованной панели в зоне стыка в виде "домика". Этот способ сварки значительно облегчает и удешевляет производство. Скорость сварки для характерных толщин 2...3 мм может быть до 25...50 м/ч.

В связи с очень большими размерами прессованных панелей (до 26 м) проводить подготовку поверхности под сварку обычными способами (травлением, осветлением, пассивированием, шабрением) практически очень сложно, так как требуется комплект ванн химической подготовки с длиной каждой ванны до 28...30 м. Поэтому наиболее рационально применение механических способов подготовки поверхности, например, вращающейся металлической щеткой. Такая простейшая подготовка поверхности под дуговую сварку алюминиевых сплавов вызывает необходимость детально исследовать возможность обеспечения качественной сварки в производственных условиях.

При простейшей механической подготовке поверхности основными дефектами сварных соединений являются оксидные включения, пористость и плохое формирование шва. Эти дефекты резко снижают статическую и циклическую прочность, а в ряде случаев – и герметичность конструкции.

Для изготовления кузова пассажирского вагона из алюминиевого сплава в большинстве случаев целесообразно применение импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в аргоне или смеси с гелием. При импульсной сварке на постоянный (базовый) ток периодически накладываются импульсы тока с частотой 50; 100 или 200 Гц, что способствует управляемому струйному переносу металла. По сравнению со сваркой неплавящимся электродом импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом позволяет в 3–8 раз повысить производительность труда и значительно снизить сварочные деформации при практически одинаковом качестве сварных соединений.

За рубежом при сварке протяженных стыков конструкций вагонов предпочтение отдается сварке трением с перемешиванием [13].

В США из свариваемых сплавов серий 6ххх, 5ххх и сплава 7005 изготовляют подвижной состав с получением оптимальных прочностных характеристик и высокой коррозионной стойкости сварных элементов. Конструкционным материалом для силовых элементов в вагоностроении являются сплавы 2024, 5083 и 6061, обшивка вагона и его внутренняя отделка выполняются из сплавов 3003 и 6063.

Незаменимым материалом являются алюминиевые свариваемые сплавы марок 5083, 5454 и 6061 в конструкциях грузовых вагонов с различными вариантами их исполнения. При изготовлении вагонов-цистерн для продуктов нефтехимической промышленности преобладают магналиевые сплавы (5052, 5086 и 5454).

Автомобильный транспорт. Одним из основных требований к материалам, применяемым в автомобильном транспорте, является малая масса и достаточно высокие показатели прочности. Учитывают также коррозионную стойкость и хорошую декоративную поверхность материала.

Высокая удельная прочность алюминиевых сплавов увеличивает грузоподъемность и уменьшает эксплуатационные расходы передвижного транспорта. Высокая коррозионная стойкость материала продляет сроки эксплуатации, расширяет ассортимент перевозимых товаров, включая жидкости и газы с высокой агрессивной концентрацией.

Широкому применению алюминия в конструкции автомобилей взамен стали препятствуют два существенных фактора:

стоимость алюминиевых сплавов, которая в 2 раза выше стали; трудности, связанные с использованием его в кузовах в условиях установившегося массового производства (холодная штамповка, сварка, окраска).

Вопросы стоимости могут быть решены в пользу алюминия при больших объемах производства. Вторичная переработка даст ощутимый положительный результат при тесном взаимодействии изготовителей

автомобильной техники с изготовителями материалов для нее. Максимальный экономический эффект в результате вторичной переработки алюминия ожидается в том случае, если "алюминиевый" автомобиль будет специально сконструирован с учетом последующего быстрого демонтажа для переработки. Автомобильные фирмы обратились к концепции модульного принципа проектирования, принятой ранее авиакосмическим комплексом и позволившим ему добиться значительных успехов.

В дальнейшем применение алюминиевых сплавов позволит разрабатывать автомобили с гибридной силовой установкой, сочетающей электрическую тягу с обычным двигателем, и электромобилей. В марте 2000 г. на автосалоне в Детройте фирма *General Motors* продемонстрировала концептуальную модель *GM Precept* с гибридным двигателем, имеющую расход топлива 2,6 л/100 км. Этот автомобиль — полноразмерный пятиместный седан длиной около 5 м, кузов которого выполнен из алюминиевого сплава [14].

Фирмой *Nissan,* которая раньше других начала такие разработки еще в середине 1970-х гг., также создан перспективный электромобиль *FEV (Future Electric Vehicle).* Кузов этого электромобиля имеет каркас, изготовленный из алюминиевого сплава вместо стали, что позволило снизить массу полностью оборудованного и заправленного горючим автомобиля до 900 кг, включая 200-килограммовую быстро перезаряжаемую никель-кадмиевую аккумуляторную батарею. При замене стальных деталей на алюминиевые массу электромобиля можно уменьшить на 20...25 %, а полезную нагрузку и пробег без подзарядки аккумуляторных батарей увеличить на 30...33 %.

Предполагается, что рост применения алюминия в грузовых и специальных автомобилях будет опережать рост его применения в легковых автомобилях. Это связано с тем, что использование алюминиевых сплавов в конструкции грузовых автомобилей значительно сократит производственные затраты и благоприятно скажется на сохранении окружающей среды. Кроме того, если применение алюминия в легковых автомобилях позволяет в результате снижения их массы уменьшить, в основном, расход топлива, то в грузовых и специальных автомобилях это дает возможность увеличить полезную нагрузку (на 1...2 т) в пределах разрешенной максимальной массы [15].

Модульный принцип конструирования был использован фирмой *Daimler-Chrysler,* позволивший создать сварную раму из прессованного алюминиевого сплава для кабины в мусороуборочном автомобиле *Econic.* Большим достоинством алюминиевых сплавов является их высокая коррозионная стойкость, что обеспечивает сохранение корпуса автомобиля в рабочем состоянии даже после эксплуатации в течение 20 лет при самых неблагоприятных погодных условиях. Это дополнительно снижает затраты труда и средств на обслуживание.

Шведская фирма *Scania* выполнила полностью из алюминиевого сплава кузов нового поколения городских автобусов *Omni-City.* При этом каркасная конструкция из прессованного алюминиевого профиля напоминает концепцию *Space-Frame* у модели *Audi A8.* Применение алюминиевого сплава позволило снизить массу автобуса почти на 600 кг, что повысило пассажировместимость и снизило текущие затраты, связанные, в частности, с повышенным расходом топлива при частых разгонах и торможении на остановках и у светофоров.

Алюминиевые сплавы можно эффективно использовать для снижения массы сельскохозяйственной техники (например, путем изготовления из них кабин тракторов и комбайнов). Это актуально в связи с принявшей широкие масштабы эрозией почвы в результате применения тяжелой техники.

В России работы по внедрению алюминия в автотранспорте проводятся фрагментарно и стихийно без правового и финансового участия государственных органов. Это определяется различными факторами, среди которых немаловажным является отсутствие законов, вынуждающих автомобилестроителей, исходя из мирового опыта, расширять использование алюминия в новых моделях. Масса алюминиевых деталей в автомобиле отечественного производства составляет ~ 15 кг.

В большинстве случаев для корпусов легковых автомобилей алюминиевые сплавы применяют в виде деталей, полученных методом листовой штамповки из листов толщиной от 0,8 до 1,3 мм, для которых требуется хорошая штампуемость в сочетании с достаточными прочностными характеристиками в готовом изделии. Штампуемость листов зависит от химического состава, свойств и структуры сплава: размера и формы зерна, неоднородности зерен, количества, морфологии и размеров интерметаллических частиц, степени изотропности механических свойств, склонности сплава к деформационному упрочнению и старению [16, 17].

По данным различных авторов, для листов из алюминиевых сплавов размер зерна должен составлять 1,5...50 мкм. Крупное зерно является причиной появления на деформированных участках детали шероховатой поверхности ("апельсиновая корка"), которая портит внешний вид и может быть одной из причин разрывов при глубокой вытяжке. С уменьшением величины зерна (по сравнению с оптимальным размером) возрастает сопротивление деформированию, увеличивается "пружинение" металла, существенно влияющее на точность размеров штампуемого изделия, повышается износ рабочих поверхностей штампа.

Наряду с хорошей штампуемостью важное значение для листовых сплавов имеют прочность, характер дисперсионного упрочнения и сопротивление коррозии. Для оценки их прочности выбрали условный предел текучести, который должен быть как можно ниже перед операциями формообразования для обеспечения лучшей штампуемости и уменьшения пружинения при штамповке. После формовки и горячей сушки лакокрасочного покрытия требуется высокий пре-

дел текучести для достижения хорошей жесткости деталей и устойчивости против вмятин.

Основные требования к алюминиевым листам для получения наружных деталей корпуса автомобилей холодной штамповкой сформулированы ведущими зарубежными фирмами и в общем виде могут быть представлены следующим образом:

– размер зерна 2...50 мкм;

– средний уровень $\sigma_{0,2}$ в закаленном и естественно состаренном состоянии (Т) не выше 110...150 МПа;

– отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_в < 0,55$;

– способность к повышению $\sigma_{0,2}$ до 250...300 МПа при искусственном старении (состояние Т1), что позволит получить в результате нагрева при окончательной покраске $\sigma_{0,2}$ = 180 МПа;

– высокий уровень параметров листов в состоянии Т, определяющих хорошую формуемость: общее относительное удлинение $\delta_{общ} > 30$ %; равномерное относительное удлинение $\delta_{равн} > 25$ %; коэффициент вытяжки $n > 0,25$; минимальный радиус гиба $r > 0,7$;

– отсутствие склонности к образованию линий Чернова–Людерса для обеспечения зеркальной поверхности после покраски;

– высокая коррозионная стойкость, в том числе сопротивление нитевидной коррозии.

Анализ патентов и технической литературы показал, что за рубежом в автомобильной промышленности для деталей корпуса применяются два типа алюминиевых сплавов – термически неупрочняемые сплавы систем A1–Mn серии 3ххх, Al –Mg серии 5ххх и термически упрочняемые сплавы систем Al–Cu, Al–Cu–Mg, Al–Mg–Si, Al–Mg–Si–Cu серий 2ххх и 6ххх.

Из термически неупрочняемых сплавов наиболее широко используют листы из сплава марки 5182-0, имеющие в отожженном состоянии мелкозернистую структуру и хорошую штампуемость. Отрицательным свойством сплавов серии 5ххх при холодном формообразовании является быстрая наклепываемость и склонность к образованию линий Чернова–Людерса, что ограничивает их применение для изготовления внутренних деталей корпуса [18].

Эффект упрочнения алюминиевых сплавов при сушке окрашенных деталей (170...200 °С) сильно зависит от типа сплава. Для сплавов серии 5ххх сушка практически не изменяет их свойства, а иногда может частично снижать. Термически упрочняемые сплавы, обеспечивающие хороший внешний вид, упрочняются в процессе сушки лакокрасочного покрытия, поэтому они более предпочтительны в качестве материала для внешних деталей корпуса.

Сплавы серии 2ххх (2008 и 2036) имеют низкий эффект старения при сушке краски и уступают по прочности сплавам серии 6ххх (системы A1–Mg–Si и Al–Mg–Si–Cu).

Способность к формуемости при холодной штамповке, свариваемость и коррозионная стойкость листового материала из сплавов серии 6ххх находятся на уровне термически неупрочняемых сплавов системы Al–Mg. Однако при этом после нагрева в процессе сушки краски они обладают более высокой прочностью в результате подстаривания. Детали из сплавов серии 6ххх имеют наиболее высокое качество поверхности, так как эти сплавы не склонны при деформации к образованию линий Чернова–Людерса.

В Европе в качестве основного сплава для наружных деталей корпуса используют хорошо штампуемый сплав 6016. В Северной Америке преобладают сплавы 6111 и 6061 с более высокой прочностью, что обеспечивает им более высокую устойчивость против вмятин.

Из отечественных сплавов системы Al–Mg–Si наиболее близким к зарубежным сплавам по уровню прочности и пластичности является сплав АВ. Из этого сплава изготовляют листы толщиной 0,3...10,5 мм и поставляют по ГОСТ 21631 [19] в трех состояниях: отожженном (сплав АВМ); закаленном и естественно состаренном (сплав АВТ); закаленном и искусственно состаренном (сплав АВТ1).

Сдаточными параметрами листов сплава АВ являются: качество поверхности; габаритные размеры; временное сопротивление разрыву и относительное удлинение в поперечном направлении. При этом размер зерна и предел текучести не регламентируются, хотя $\sigma_{0,2}$ является важной характеристикой для оценки технологичности на стадии получения детали, а также работоспособности.

Однако из практики известно, что полуфабрикаты из сплавов системы Al–Mg–Si, в том числе и листы из сплава АВ, склонны к разнозернистости с выраженной текстурой рекристаллизации. Это резко снижает их способность к формуемости и ухудшает внешний вид детали, получаемой при холодной штамповке. Таким образом, наша промышленность не выпускает листы, удовлетворяющие требованиям автомобилестроения.

Работа, направленная на разработку режима термомеханической обработки листов из серийного сплава АВ для получения листов с регламентированным размером зерна 20...40 мкм и высокими показателями формуемости, проведена в ФГУП "ВИАМ" в 2001 г.

В результате проведенного исследования для листов сплава АВ был разработан режим термической обработки, который обеспечивает получение рекристаллизованной структуры с зерном размером 20×40 мкм. Испытания показали, что такие листы имеют изотропные свойства и по технологическим характеристикам сравнимы с листами из сплавов 6016, АМг2 и АМг4.

Старение листов сплава АВ с рекристаллизованной структурой рекомендуется проводить при 170 °С, 14 ч, для получения максимальных свойств: $\sigma_в$ = 350 МПа; $\sigma_{0,2}$ = 300 МПа; δ = 12 %.

Деформируемые алюминиевые сплавы применяются при изготовлении рам, кабин, кузова, салона автобуса, а также всевозможных емкостей и цистерн. Детали двигателя (поршни, головки и блоки цилиндров) изготовляют из алюминиевого литья, которое имеет высокую теплопрочность.

При изготовлении элементов каркаса, обшивки кузова полуприцепа автофургона, рефрижератора,

скотовоза и т.п. перспективным материалом являются алюминиевые сплавы АД31, 1915 (прессованные профили) и сплавы АМг2, АМг5 (лист).

Находят применение алюминиевые сплавы АМц, АМг3 и 1915 при изготовлении отдельных узлов легкового автомобиля (навесные детали, бамперы, радиаторы охлаждения, отопители).

Из прессованных полуфабрикатов сплавов 2014 и 6061 изготовляют балки, рамы тяжелых грузовых автомобилей. Панели и отдельные элементы из сплава 5052 поступают на изготовление кабины. В качестве обшивочного материала кузова грузовика используют лист из сплавов 5052, 6061, 2024, 3003 и 5154. Стойки кузова выполняются из прессованных полуфабрикатов сплавов 6061 и 6063. Магналиевые сплавы серии 5xxx (5052, 5086, 5154 и 5454) являются основным материалом при изготовлении автоцистерн.

Выводы

1. Алюминиевые свариваемые сплавы являются широко применяемым конструкционным материалом, как в традиционно ориентированных на них отраслях (авиационная промышленность и ракетостроение), так и в железнодорожном и автомобильном транспорте.

2. В качестве основного сплава для наружных деталей кузова легкового автомобиля и пассажирского вагона в Европе используют сплав 6016, в Северной Америке – сплавы 6111 и 6061 более высокой прочности. Отечественным аналогом сплавов этой серии является серийный алюминиевый деформируемый сплав АВ. Листы из этого сплава выпускают по ГОСТ 21631, но в нем не регламентируются предел текучести, размер зерна и параметры, определяющие технологичность при холодной штамповке.

3. В России разработан режим термической обработки, позволяющий получать листы сплава АВ с регламентированной рекристаллизованной структурой и параметрами технологичности, обеспечивающими возможность использования листов для наружных панелей автомобилей. Упрочнение сплава АВ в результате старения в процессе сушки лакокрасочного покрытия обеспечивает получение свойств на уровне стального листа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Современные технологии авиастроения** / Коллектив авторов: под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.

2. **Шалин Р.Е., Ефремов И.С., Яровинский Ю.Л., Лукин В.И.** Опыт проектирования и изготовления крупногабаритных конструкций из алюминиево-литиевых сплавов изделий ракетно-космической техники // Сварочное производство. 1996. № 11. С. 14–18.

3. **Братухин А.Г., Редчиц В.В., Лукин В.И.** Перспективы использования алюминиево-литиевых сплавов для штампосварных конструкций летательных аппаратов // Сварочное производство. 1996. № 7. С. 18–21.

4. **Бецофен С.Я., Мацнев В.Н., Костыкова О.С., Масюков С.А.** Текстура и анизотропия механических свойств титановых и алюминиевых сплавов // Авиационная промышленность. 2004. № 4. С. 31–35.

5. **Захаров В.В.** Некоторые проблемы использования алюминиево-литиевых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 2. С.8–14.

6. **Сироткин О.С., Мацнев В.Н., Рязанцев В.И.** Конструктивно-технологические проблемы производства топливных баков для многоцелевой авиационно-космической системы // Авиационная промышленность. 2001. № 3. С. 5–12.

7. **Мацнев В.Н., Рязанцев В.И., Данилов С.Ф.** Исследование технологических возможностей алюминиево-литиевого сплава 01421 для штампосварных интегральных конструкций // Авиационная промышленность. 2004. № 4. С. 36–40.

8. **Lanping H., Kanghua C., Zigiao Z., Yongping H.** Влияние серебра и марганца на характеристики старения и микроструктуру сплава Al–Cu–Li // Rare Metal Mater. and Eng. 2005. 34. № 8. P. 1322–1325.

9. **Na J., Jin-feng L., Ziquao Z., Xiu-yu W., Yan-fen L.** Effect of aging on mechanical properties and localized corrosion behaviors of Al-Cu-Li alloy // Trans. Nonferrous Metal. Soc. China. 2005. 15. № 1. P. 23–29.

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

11. **Использование** алюминия в вагоностроении // Железные дороги мира. 1995. № 11. С. 16–19.

12. **Рязанцев В.И., Мацнев В.Н., Бардин В.В., Черкашин А.В**. Конструктивно-технологическая схема цельносварного кузова пассажирского вагона из алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 2001. № 3. С. 31–37.

13. **Ищенко А.Я., Подъельников С.В., Покляцкий А.Г.** Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) // Автоматическая сварка. 2007. № 11. С. 32–38.

14. **Триндюк Л.М., Петров Р.Л.** Материалы в автомобиле // Автомобильная промышленность. 1998. № 6. С. 30–33.

15. **Алюминий** в производстве грузовых и специальных автомобилей // Технология машиностроения. 2001. № 1. С. 73–74.

16. **Цепов С.И. и др.** Алюминиевые сплавы как альтернатива стали для нагружения деталей легкового автомобиля // Новые направления развития производства и потребления алюминия и его сплавов: сборник. Самара, 2000. С. 54–56.

17. **Фридляндер И.Н., Сандлер В.Г., Грушко О.Е., Берсенов В.В. и др**. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в автомобилестроении // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 9. С. 3–9.

18. **Hirosuke Inagaki, Toshio Komatsubara.** Yield Point Elongation in Al–Mg Alloys // Aluminium Alloys: ICAA-7. Apr. 9–14. 2000. Virginia. USA. P. 1303–1308.

19. **ГОСТ 21631–76.** Листы из алюминия и алюминиевых сплавов.

Марина Алексеевна Гуреева, канд. техн. наук;
Ольга Евгеньевна Грушко, д-р техн. наук;
Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук

УДК 621.983

Э.А. Назарян *(Ереванский государственный университет)*,
Н.Н. Араб *(Свободный Университет, г. Савэ, Исламская Республика Иран)*

Деформации при отбортовке круглых отверстий в тонких пластинах

Проведен теоретический анализ процесса отбортовки круглых отверстий в тонких пластинах с учетом взаимосвязанного изменения толщины и деформационного упрочнения. Показана возможность определения текущих значений деформаций в нестационарных процессах формоизменения. В процессе отбортовки определена координата материального элемента, разграничивающего область сжатия и растяжения в меридиональном направлении.

The theoretical analysis of flanging process of circular holes in thin plates in view of interconnected changes of thickness and deformation hardening is carried out. The possibility of definition of current deformation values in non-stationary forming processes is shown. The coordinate of the material element differentiating compression and stretching area in meridian direction in the flanging process is defined.

Ключевые слова: отбортовка; деформация; напряжение; деформационное упрочнение.

Key words: flanging; strain; stress; strain hardening.

Многочисленные проблемы формоизменения листового металла требуют решения задач по определению напряженно-деформированного состояния при больших пластических деформациях. К таким проблемам, в первую очередь, относится прогнозирование параметров прочности и точности изделий, изготовленных формоизменяющими операциями листовой штамповки.

Отличительной особенностью таких задач является то, что исходные одинаковые материальные элементы листовой заготовки, деформируясь в поле пластических деформаций, приобретают характерные особенности, обусловленные этими деформациями.

Особенность рассматриваемых элементов характеризуется такими показателями, как изменение толщины, величина накопленной деформации, напряжение текучести и т.д. В процессе формоизменения в рассматриваемом элементе накапливается определенная деформация и вследствие деформационного упрочнения изменяется напряжение текучести этого элемента.

Следовательно, прогнозирование параметров прочности и точности возможно при известном распределении интенсивности деформаций, так как, с одной стороны, она однозначно определяется компонентами деформаций, а с другой – характеризует степень деформационного упрочнения.

Данная статья является продолжением серии работ [1–3] и посвящена теоретическому анализу процесса отбортовки круглых отверстий в тонких пластинах с учетом взаимосвязанного изменения толщины и деформационного упрочнения (при этом известные аспекты процесса отбортовки опущены).

Рассмотрим процесс формоизменения при отбортовке круглых отверстий в тонких пластинах, осуществляемой пуансоном с плоским торцом [4].

В работах [1–3] показано, что исходные уравнения, характеризующие пластическое плоское напряженное состояние, имеющее место при отбортовке круглых отверстий в тонких пластинах, а именно:

- уравнение равновесия с учетом переменности толщины;
- уравнение связи напряжений и приращений деформаций;
- условие постоянства объема;
- условие пластичности Мизеса

приводятся на девиаторной плоскости цилиндра пластичности к достаточно простой дифференциальной зависимости:

$$d\sigma_\rho = \sigma_s \, d\varepsilon_i . \qquad (1)$$

При выводе (1) меридиональное σ_ρ и окружное σ_θ напряжения, выраженные через параметр деформированного состояния, использованы в виде

$$\sigma_\rho = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \cos(\varphi + \pi/6); \quad \sigma_\theta = -\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \sin\varphi, \qquad (2)$$

а компоненты приращений деформаций представлены известными зависимостями:

$$d\varepsilon_\rho = d\varepsilon_i \cos\varphi; \quad d\varepsilon_\theta = d\varepsilon_i \cos(\varphi + 2\pi/3); \qquad (3)$$
$$d\varepsilon_z = d\varepsilon_i \cos(\varphi + 4\pi/3),$$

которые однозначно удовлетворяют интенсивности приращения деформаций, определяемой с учетом условия постоянства объема, соотношением

$$d\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{d\varepsilon_\rho^2 + d\varepsilon_\rho d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_\theta^2}. \qquad (4)$$

Изотропное деформационное упрочнение изображается на девиаторной плоскости цилиндра пластичности в виде окружностей с радиусами $\sigma_s/\sqrt{3}$, которые увеличиваются в радиальном направлении на величину, определяемую значением накопленной деформации [3]

$$\sigma_s = A\varepsilon_i^n, \qquad (5)$$

где A, n – постоянные, характеризующие деформационное упрочнение.

Текущее значение накопленной деформации с учетом условия постоянства объема определяется зависимостью

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_\rho^2 + \varepsilon_\rho \varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2}. \qquad (6)$$

Из сопоставления (4) и (6) следует, что в общем случае интенсивность приращений деформаций $d\varepsilon_i$ не равна приращению интенсивности $d\bar{\varepsilon}_i$, определяемой дифференцированием зависимости (6). Поэтому интегрирование дифференциального уравнения (1) с учетом (5) возможно только для радиальных путей деформаций, при которых для данного материального элемента отношение компонент приращений деформаций остается постоянным.

Пределы изменения параметра φ в рассматриваемой задаче устанавливаются исходя из определения процесса отбортовки, при котором для всего очага текущие значения окружных деформаций являются положительными, увеличиваясь от нуля на границе недеформируемой части заготовки до наибольшего значения на кромке отверстия.

Из анализа зависимостей (2) следует, что на границе недеформируемой части заготовки меридиональные растягивающие напряжения не могут превышать значения $2\sigma_s/\sqrt{3}$, соответствующего направлению $\varphi = 11\pi/6$, при котором $\varepsilon_\theta = 0$, а из условия отсутствия меридиональных растягивающих напряжений на кромке отверстия следует, что краевой элемент деформируется в условиях окружного растяжения в положительном направлении оси ε_θ, что соответствует направлению $\varphi = 4\pi/3$.

Из приведенного выше следует, что теоретически возможный диапазон реализации процесса отбортовки, при котором для всех материальных элементов текущее значение окружной деформации $\varepsilon_\theta \geq 0$, расположен на девиаторной плоскости цилиндра пластичности в пределах изменения параметра φ в диапазоне $4\pi/3 \leq \varphi \leq 11\pi/6$. Следовательно, все типы деформаций в процессе отбортовки полностью характеризуются радиальными лучами, расположенными в секторе с центральным углом $\varphi = \pi/2$ (рис. 1).

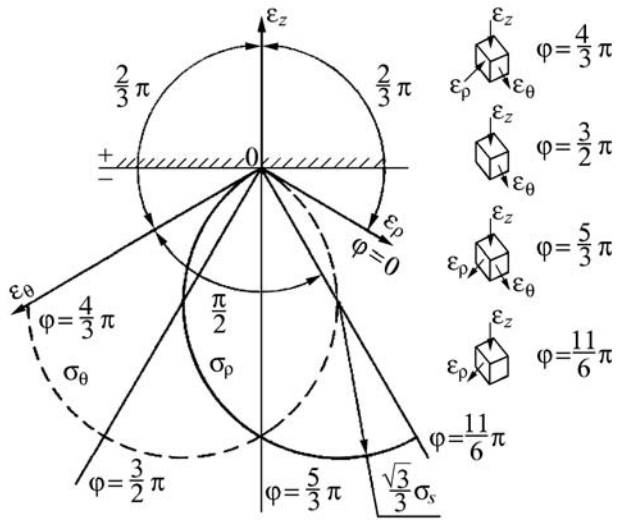


Рис. 1. Напряженное состояние и виды деформаций при отбортовке

Если путь деформации совпадает с осью ε_θ, то ε_θ – деформация растяжения в окружном направлении, а ε_ρ и ε_z – деформации сжатия, численно равные $\varepsilon_\theta/2$.

Если путь деформации совпадает с отрицательным направлением оси ε_z, то ε_z – деформация сжатия по толщине, а ε_ρ и ε_θ – деформации растяжения, численно равные $\varepsilon_z/2$.

Если путь деформации совпадает с направлением $\varepsilon_\rho = 0$, а ε_θ и ε_z равны по величине и противоположны по знаку, то имеет место чистый сдвиг или плоская деформация в плоскости (θ, z).

Если путь деформации совпадает с направлением $\varepsilon_\theta = 0$, а ε_ρ и ε_z равны по величине и противоположны по знаку, то имеет место чистый сдвиг или плоская деформация в плоскости (ρ, z).

Таким образом, пути деформации с углами $\varphi = 3\pi/2$ и $11\pi/6$ соответствуют чистому сдвигу соответственно в плоскостях (θ, z) и (ρ, z), а с углами $\varphi = 4\pi/3$ и $5\pi/3$ – чистому растяжению и сжатию соответственно в окружном направлении и в направлении по толщине.

Для установления соответствия между координатами рассматриваемых элементов и параметров деформированного состояния проинтегрируем уравнение (1) при ранее принятом допущении о радиальном характере накопления текущих деформаций. Приравнивая результат интегрирования значению меридио-

нального напряжения, определяемого зависимостью (2), получаем

$$\varepsilon_i^{1+n} - \varepsilon_{\text{кр}}^{1+n} = (1+n)\varepsilon_i^n \frac{2}{\sqrt{3}}\cos(\varphi + \pi/6). \qquad (7)$$

При интегрировании (1) использовано граничное условие, согласно которому для краевого элемента $\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{кр}}$; $\sigma_\rho = 0$ (кромка отверстия деформируется в окружном направлении в условиях линейного растяжения на протяжении всего процесса формоизменения).

Известное распределение интенсивности деформаций по углу φ позволяет перейти к установлению взаимосвязи между координатой ρ рассматриваемого элемента и параметром φ на девиаторной плоскости цилиндра пластичности. Для начальной стадии процесса формоизменения ($\varepsilon_{\text{кр}} = 0$), продифференцировав выражение (7) и приравняв результат (3) ($d\bar{\varepsilon}_i = d\varepsilon_i$, $d\varepsilon_\theta = d\rho/\rho$) [2], получим:

$$d\varepsilon_\theta = \frac{d\rho}{\rho} = (1+n)\times$$
$$\times(\sin\varphi\cos\varphi + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin^2\varphi + \frac{\sqrt{3}}{6}\cos^2\varphi)d\varphi. \qquad (8)$$

Выражение (8) после интегрирования примет вид:

$$\ln\rho = (1+n)\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\varphi - \frac{1}{4}\cos2\varphi - \frac{\sqrt{3}}{12}\sin2\varphi\right) + c, \qquad (9)$$

где постоянная интегрирования c находится из граничного условия, согласно которому при $\varphi = 4\pi/3$, $\rho = r_0$ (r_0 – исходный радиус отверстия).

Подставляя значение постоянной интегрирования в (9), после несложных преобразований получаем:

$$\frac{\rho}{r_0} = \exp(1+n)\left(\frac{\sqrt{3}}{3}(\varphi - 4\pi/3) - \frac{1}{4}\cos2\varphi - \frac{\sqrt{3}}{12}\sin2\varphi\right). \qquad (10)$$

Из (10) следует, что очаг деформаций имеет наибольшие размеры при $\varphi = 11\pi/6$ ($\varepsilon_\theta = 0$), $\rho = \rho_0$ (ρ_0 – радиус очка матрицы) и равен

$$\frac{\rho_0}{r_0} = \exp(1+n)\frac{\sqrt{3}}{3}\frac{\pi}{2} \approx 2{,}475(1+n). \qquad (11)$$

При $n = 0$ предельное значение отношения ρ_0/r_0 совпадает с результатом работы [1], полученным при решении задачи с учетом изменения толщины для идеально жесткой пластической модели деформируемого материала.

Зависимость (10) устанавливая однозначную связь между начальной координатой рассматриваемого элемента и параметром φ, позволяет по-новому рассматривать процесс отбортовки, разделив его на два этапа.

На начальном этапе деформирования по мере опускания пуансона происходит образование очага пластических деформаций от внешней границы (на кромке очка матрицы) к внутренней, при этом элементы заготовки перемещаются в меридиональном направлении, и толщина их уменьшается.

Следовательно, существует элемент, деформирующийся в направлении $\varphi = 3\pi/2$, для которого меридиональная деформация $\varepsilon_\rho = 0$ на протяжении всего процесса формоизменения. Для определения координаты ρ этого элемента, подставляя в (10) $\varphi = 3\pi/2$, получаем

$$\frac{\rho}{r_0} = \exp(1+n)\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\frac{\pi}{6} + \frac{1}{4}\right) \approx 1{,}737(1+n). \qquad (12)$$

Сравнивая полученный результат для относительной координаты, разграничивающей область укорочения от области удлинения в меридиональном направлении при $n = 0$ с результатом работы [4] ($\rho/r_0 \approx 2$), который получен без учета изменения толщины и влияния деформационного упрочнения, видим, что в [4] он несколько завышен.

Таким образом, все материальные элементы с относительной координатой меньше величины, определяемой (12), в меридиональном направлении укорачиваются, подвергаясь радиальному сжатию, а элементы с относительной координатой больше этой величины – в меридиональном направлении удлиняются, подвергаясь радиальному растяжению.

Следовательно, при расчете параметров процесса отбортовки необходимо исходить из значения коэффициента отбортовки. При малых значениях коэффициента отбортовки деформации $\varepsilon_\rho \le 0$ и суммарная высота борта меньше ширины отбортовываемой части заготовки.

При больших значениях коэффициента отбортовки, когда в очаге деформаций ε_ρ меняет знак, деформации сжатия в меридиональном направлении в некоторой степени компенсируются деформациями растяжения, и становится возможным применение расчета, исходящего из равенства длины развертки борта по средней линии и ширины отбортовываемой части заготовки.

Зная характер распределения интенсивности деформаций, можно определить компоненты деформаций:

$$\varepsilon_\rho = \frac{1+n}{2}\left(1 + \cos2\varphi - \frac{\sqrt{3}}{3}\sin2\varphi\right);$$
$$\varepsilon_\theta = -\frac{1+n}{2}\left(\cos2\varphi + \frac{\sqrt{3}}{3}\sin2\varphi\right); \qquad (13)$$
$$\varepsilon_z = -\frac{1+n}{2}\left(1 - \frac{2\sqrt{3}}{3}\sin2\varphi\right).$$

На рис. 2 приведены графики изменения интенсивности и компонент деформаций при изменении параметра φ в диапазоне $4\pi/3 \le \varphi \le 11\pi/6$ для начального этапа деформирования ($\varepsilon_{\text{кр}} = 0$) при $n = 0{,}2$.

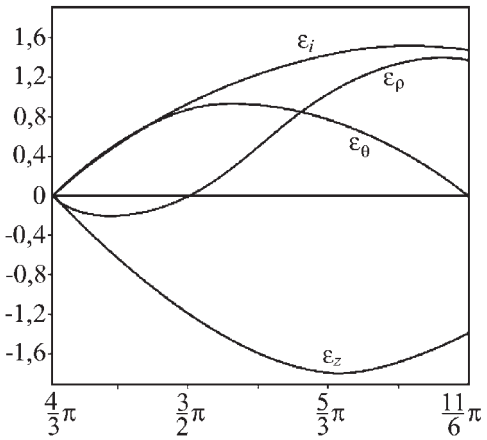


Рис. 2. Распределение интенсивности и компонент деформаций на начальном этапе деформирования

Из (13) и рис. 2 следует, что в очаге деформаций некоторый элемент с параметром деформированного состояния $\varphi = 19\pi/12$ в начальный момент деформирования получает наибольшую окружную деформацию, равную $\frac{\sqrt{3}}{3}(1+n)$. Относительную координату материального элемента, получившего наибольшую окружную деформацию, находим из (10):

$$\rho / r_0 \approx 2{,}1(1+n).$$

На втором этапе деформирования по мере увеличения текущего радиуса кромки отверстия начинается образование вертикальной стенки борта, и в конечный момент деформирования все материальные элементы в окружном направлении получают заданное значение деформации, определяемое отношением размеров отверстия и деформирующего инструмента.

На рис. 3 приведены пути и распределения деформаций при разных значениях деформации кромки отверстия для параметра деформационного упрочнения $n = 0{,}2$.

Учитывая, что деформации не могут скачкообразно принимать нулевые значения на границе недеформируемой части заготовки ($\varphi = 11\pi/6$), на рис. 3 штриховой линией показана зона плавного уменьшения интенсивности деформаций от текущих значений до нуля.

На втором этапе деформирования процесс формоизменения носит ярко выраженный нестационарный характер, при котором происходит непрерывное изменение размеров очага пластических деформаций. Невозможность определения текущих значений компонент деформаций из (7) в аналитическом виде связана с невозможностью его представления в виде явной функции от параметра φ и деформации кромки отверстия. Поэтому определение текущих значений и характера изменения компонент деформации проведено путем графического проектирования вектор-функции $\bar{\varepsilon}_i(\varphi, \varepsilon_{кр})$ на косоугольные координатные оси $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$.

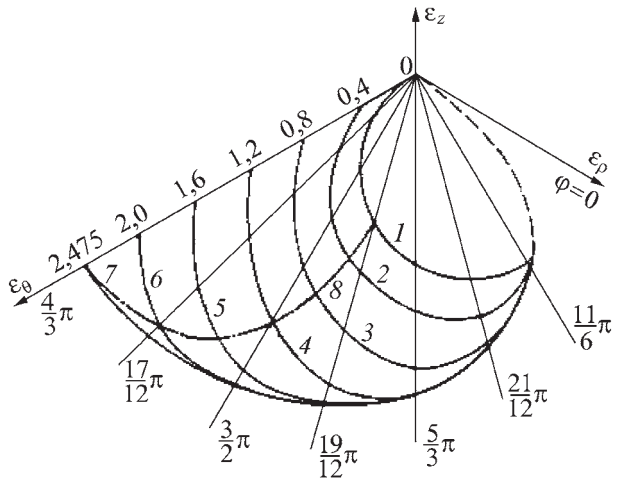


Рис. 3. Пути и распределение деформаций на втором этапе деформирования:
1 и *2–7* – распределение деформаций на начальном и последующих этапах деформирования соответственно; направления $4\pi/3 ... 11\pi/6$ – пути деформаций; *8* – линия наибольших окружных деформаций

На рис. 4 приведены графики изменения текущих значений компонент деформаций при переменном очаге деформаций для $n = 0{,}2$.

Из рис. 4 следует, что для всего очага деформации по толщине являются отрицательными, а деформации в окружном направлении – положительными. Радиальные деформации в направлении $\varphi = 3\pi/2$ меняют знак, вследствие чего часть очага в процессе формоизменения находится в условиях радиального сжатия и окружного растяжения, а часть – в условиях двухосного растяжения.

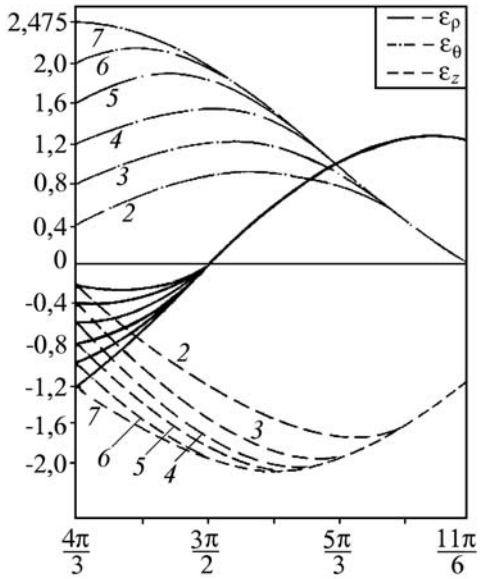


Рис. 4. Графики изменения текущих значений компонент деформаций при переменном очаге деформаций:
2 – 7 – см. рис. 3

Выводы

1. Показана принципиальная возможность представления результатов теоретического анализа нестационарных процессов формоизменения аналитическим образом с учетом взаимосвязанного изменения толщины материала и деформационного упрочнения.

2. Установлено, что аналитические решения можно получать только для радиальных путей деформаций, для которых отношение главных деформаций для рассматриваемого элемента по ходу деформирования остается постоянным.

3. Показано, что в процессе отбортовки в очаге деформаций вид деформации меняется от чистого сдвига до линейного растяжения в окружном направлении в зависимости от направления путей деформаций.

4. Установлено однозначное соответствие между параметром деформированного состояния и относительной координатой рассматриваемого элемента, на основе чего в меридиональной плоскости определена граница раздела области удлинения и области укорочения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Назарян Э.А., Константинов В.Ф.** Кинематика деформирования в формоизменяющих операциях листовой штамповки // Вестник машиностроения. 1999. № 2. С. 35–41.

2. **Назарян Э.А., Константинов В.Ф., Аракелян М.М. и др**. Характер накопления деформаций при пластическом формоизменении осесимметричных тонкостенных оболочек // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 2. С. 20–22.

3. **Назарян Э.А., Аракелян М.М.** Предельное формоизменение при деформировании осесимметричных оболочек // Заготовительные производства в машиностроении. 2004. № 5. С. 24–27.

4. **Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н**. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 480 с.

Эрнест Агаджанович Назарян, д-р техн. наук;
Наджмеддин Нуреддин Араб, инженер

Б.И. Каменецкий *(Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург)*,
Ю.Н. Логинов *(Уральский государственный технический университет УПИ, г. Екатеринбург)*

Особенности гидроэкструзии полой заготовки из титана

Методом конечных элементов выполнено теоретическое исследование процесса гидроэкструзии полых заготовок из титана, которое показало возможность создания достаточно мягкой схемы напряженного состояния. Выполнены экспериментальные исследования процесса гидроэкструзии на подвижной оправке трубных заготовок из титана, позволяющие изготовить изделия с переменным по длине сечением.

The theoretic research of hydroextrusion process hollow titanium articles is executed by finite element method. The possibility of creation enough soft scheme of stress condition is shown. The experimental research of hydroextrusion process on die mandrel of titanium tube articles is realized. This allows making the products with variable on length by section.

Ключевые слова: гидроэкструзия; титан; полая заготовка.

Key words: hydroextrusion; titanium; hollow article.

Применение титана и его сплавов в качестве материала для изготовления элементов теплообменных аппаратов постоянно расширяется, несмотря на относительно невысокую теплопроводность этих материалов. Этому способствуют такие их свойства, как высокая коррозионная стойкость, способность сопротивляться образованию солевых отложений и т.д. Одним из видов изделий в этой сфере техники являются трубчатые изделия с переменным по длине поперечным сечением, применяемые в энергетических установках и теплообменниках в качестве переходников.

Основным методом изготовления таких изделий является ротационное обжатие трубных заготовок на оправке. Для процесса ротационного обжатия толстостенных заготовок характерны следующие недостатки: возможность возникновения микротрещин на внутреннем контуре трубы при значениях коэффициента обжатия $K > 1{,}1$, повышенные требования к трубным заготовкам по разностенности (не более 3...5 %) и шероховатости внутренней поверхности, а также малый диапазон разовых обжатий.

Возникновение микротрещин на внутреннем контуре трубы объясняется тем, что схема напряженного состояния в этом процессе неблагоприятна для металла. Сжимающие напряжения действуют здесь только в области воздействия на стенку заготовки инструмен-

та, а в других областях преобладают растягивающие напряжения, что и вызывает появление трещин.

Известно, что более мягкая схема напряженного состояния реализуется при применении гидроэкструзии, в этом случае весь объем заготовки находится под воздействием сжимающих напряжений или со стороны инструмента, или со стороны жидкости высокого давления, что позволяет избежать разрушения металла на внутреннем контуре заготовки.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное обоснование применения метода гидроэкструзии для решения поставленной задачи.

Схема процесса и теоретическое описание. Теоретическое описание процесса выполнено с помощью пакета прикладных программ "ПЛАСТ", основанного на применении метода конечных элементов. Программный комплекс "ПЛАСТ" предназначен для решения линейных, физически или геометрически нелинейных двумерных квазистатических задач методом конечных элементов в перемещениях [1]. Построение исходной неравномерной конечно-элементной сетки, а также новых адаптивных сеток в процессе расчета производится автоматически.

Рассмотрена задача в осесимметричной постановке. На рис. 1 приведена расчетная схема выполнения процесса. На заготовку *1* воздействуют давлением жидкости $p_ж$ со стороны наружного контура полой заготовки. Эта же жидкость создает давление на пуансон (на рисунке не показан), благодаря чему возникает перемещение *u*, которое использовано в качестве граничного условия. Формоизменяющими инструментами являются матрица *2* и оправка *3*, которые приняты в качестве абсолютно жестких тел АЖТ1 и АЖТ2.

Для описания деформируемого материала М1 приняты упругие и пластические характеристики, соответствующие параметрам титана марки ВТ1-0. В качестве граничных условий трения на поверхности иглы принят коэффициент трения по Амонтону 0,1; на поверхности матрицы – 0,05. Такая разница объясняется особенностями поведения смазки на контактных поверхностях в условиях действия гидростатического давления (на поверхности матрицы) и в его отсутствие (на поверхности оправки).

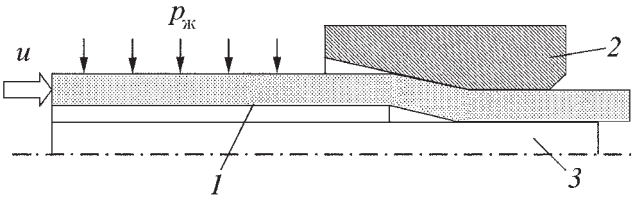


Рис. 1. Расчетная схема выполнения процесса (верхняя половина очага деформации):
1 – заготовка; *2* – матрица; *3* – оправка; *u* – заданное перемещение; $p_ж$ – давление жидкости

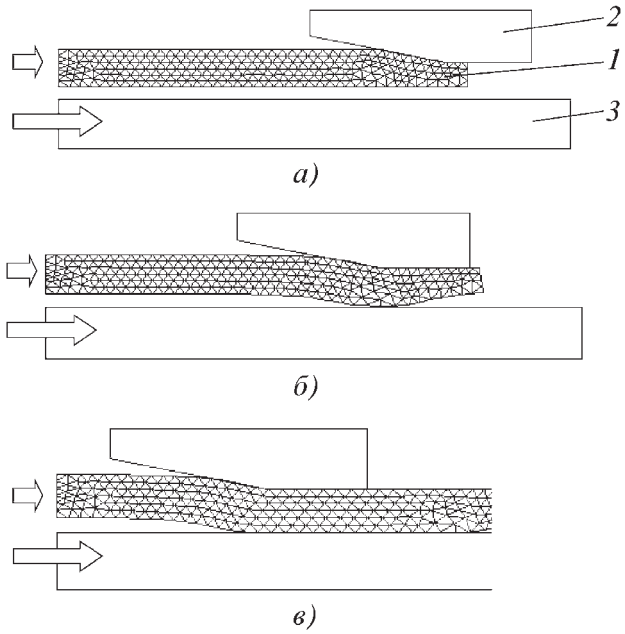


Рис. 2. Последовательность прохождения деформируемой детали *1* зазора между матрицей *2* и оправкой *3* и сетка конечных элементов (верхняя половина очага деформации):
а – исходное положение; *б* – касание оправки; *в* – заполнение очага деформации (стационарная стадия)

В базовом решении рассчитывали деформацию полой заготовки с размерами ∅8×1,5×100 мм с получением на выходе изделия с размерами ∅7×1,5×50 мм, давление жидкости назначено на уровне 90 МПа. Угол наклона образующей матрицы принят 20°.

Удовлетворительная сходимость решения была достигнута при разбиении очага деформации на совокупность треугольных конечных элементов (в количестве 460...500), имеющую 80...90 граничных узлов. Устойчивость решения задачи получена при 500 шагах нагружения.

На рис. 2 показана последовательность прохождения деформируемой детали *1* зазора между матрицей *2* и оправкой *3* и сетка конечных элементов. В этом варианте расчета, как и в последующих экспериментах, перемещение оправки синхронизировано с перемещением заднего торца заготовки.

Из приведенных рисунков видно, что процесс деформации осуществляется путем прогиба стенки полой заготовки в сторону оправки с последующим заполнением зазора между матрицей и оправкой.

Решение задачи представлено на рис. 3 в виде линий равного уровня показателя напряженного состояния σ/T (σ – гидростатическое напряжение; T – интенсивность касательных напряжений). В очаге деформации выделены области трех градаций: с уровнем σ/T: $\sigma/T < -1$, $0, -1 < \sigma/T < 0$; $0 < \sigma/T < +1$; $\sigma/T > +1$. Знак минус соответствует действию сжимающих напряжений, а плюс – растягивающих напряжений.

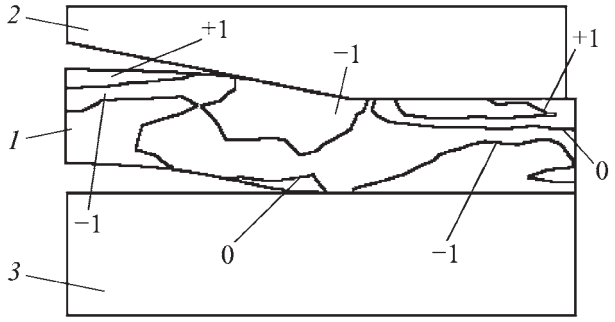


Рис. 3. Распределение показателя напряженного состояния σ/T в очаге деформации при выдавливании деформируемой заготовки *1* в зазор между матрицей *2* и оправкой *3*

Из рис. 3 видно, что на внутреннем контуре заготовки складывается благоприятная ситуация, поскольку все значения показателя напряженного состояния не имеют положительных значений. На наружном контуре трубы показатель напряженного состояния может иметь положительные значения, несмотря на приложение сжимающих напряжений со стороны жидкости высокого давления.

Это объясняется тем, что уровень давления жидкости не оказывается настолько высоким, чтобы превысить сопротивление деформации титана и вызвать пластическую деформацию стенки полой заготовки до ее входа в матрицу. Последний вариант деформации не является рациональным, поскольку после обжатия заготовки до соприкосновения ее внутренней поверхности с оправкой пришлось бы преодолевать трение на всей поверхности оправки.

Чтобы сделать вывод об опасности положительных значений показателя напряженного состояния на внешнем контуре заготовки, необходимо знать контуры очага деформации, которые на рис. 3 не видны. Поэтому на рис. 4 изображены линии равного уровня накопленной степени деформации на текущем шаге деформации.

Из рис. 4 видно, что накопление пластических деформаций локализовано на уровне конической части матрицы и не выходит за эти пределы. Вместе с тем значения σ/T на уровне +1 наблюдаются на наружном контуре заготовки за пределами пластической зоны, т.е. в упругой области. Таким образом, можно сделать вывод о том, что анализируемая схема процесса является достаточно мягкой, с преобладанием сжимающих напряжений.

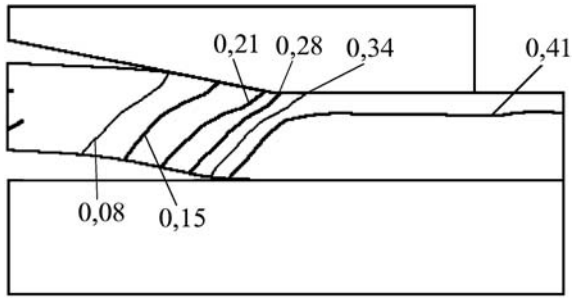


Рис. 4. Распределение накопленной логарифмической степени деформации ε в очаге деформации и за его пределами

Экспериментальная часть. Опыты по гидроэкструзии трубных заготовок выполняли в целях изучения силовых режимов, а также анализа особенностей процесса. В качестве заготовок использовали холоднотянутые толстостенные трубы длиной $l_0 = 100$ мм. Материал труб – титановый сплав ВТ1-0. Трубы изготовляли по ТУ 14-3-161–73 в мягком состоянии после отжига по стандартному режиму.

Процесс гидроэкструзии труб на подвижной оправке существенно отличается от гидроэкструзии прутков соотношением продольных (осевых) и радиальных напряжений, возникающих в заготовке под действием давления жидкости (Х.Пью. Механические свойства материалов под высоким давлением. М., 1973). При гидроэкструзии прутков радиальные и осевые напряжения, возникающие в заготовке, одинаковы и равны давлению жидкости, следовательно, $\sigma_{zz} = \sigma_{rr} = p_*$, то при гидроэкструзии труб на подвижной оправке радиальные напряжения $\sigma_{rr} = p_*$, а осевые напряжения определяются выражением:

$$\sigma_{zz} = p_* \, D_0^2 / (D_0^2 - d_0^2), \qquad (1)$$

где D_0, d_0 – наружный и внутренний диаметр трубы соответственно.

Для трубы ∅8×1,5 мм осевое напряжение составит $\sigma_{zz} = p_ж \cdot 8^2 / (8^2 - 5^2) = 1{,}64 p_ж$. Таким образом, при гидроэкструзии трубы осевое напряжение значительно больше радиального.

Вторая особенность предлагаемого процесса гидроэкструзии труб состоит в том, что при определенной степени деформации трубы $\psi_{кр}$ давление достигнет такого значения $p_{кр}$, при котором может произойти сплющивание трубы. Давление $p_{кр}$, при достижении которого труба переходит в пластическое состояние, можно рассчитать по известной формуле:

$$p_{кр} = \sigma_т \ln D_0 / d_0, \qquad (2)$$

где $\sigma_т$ – предел текучести материала трубы при растяжении.

Для проведения экспериментов по гидроэкструзии трубы ∅8×1,5 мм с различными степенями деформации были изготовлены четыре матрицы и четыре оправки. Матрицы изготовлялись из стали Х12М (ГОСТ 5950–87) с термообработкой до твердости 55...60 HRC. Все матрицы имели угол конуса $2\alpha = 40^0$ и следующие диаметры калибрующих поясков: 7,0; 6,5; 6,0 и 5,5 мм.

Материал оправок – сталь Х12М с термообработкой до твердости 50...55 HRC. Все оправки имели одинаковые размеры верхней части и следующие диаметры стержней: 4,0; 3,5; 3,0 и 2,5 мм.

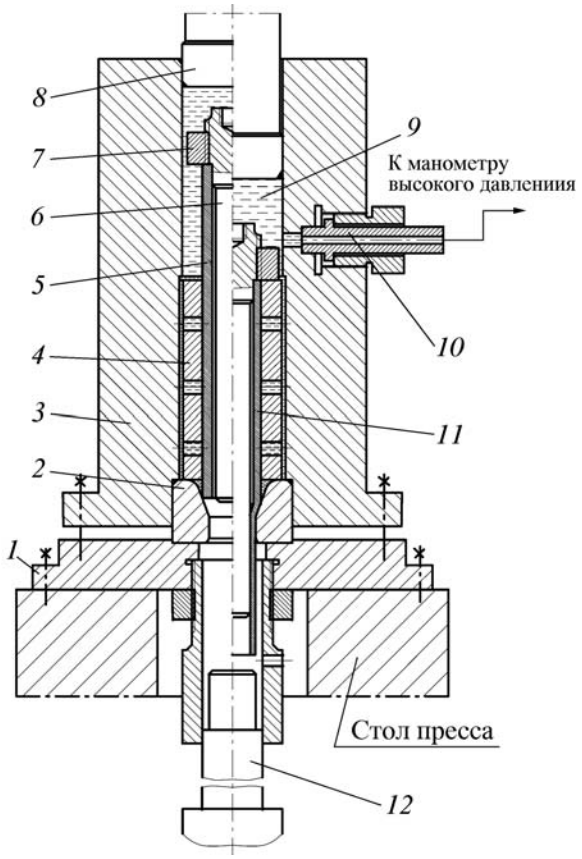


Рис. 5. Схема устройства для гидроэкструзии:
1 – опора; *2* – матрица с уплотнениями; *3* – контейнер; *4* – направляющая втулка; *5* – трубная заготовка; *6* – оправка; *7* – гайка; *8* – плунжер с уплотнениями; *9* – рабочая жидкость; *10* – штуцер высокого давления; *11* – деформированное изделие; *12* – толкатель

Наружная и внутренняя поверхности трубных заготовок покрывались на длине 60 мм слоем смазки ЭЛП-В (ТУ 6-08-314–85). Стержень оправки натирали порошковой смазкой фирмы "ТЕСМА".

Процесс гидроэкструзии труб осуществлялся в устройстве, изображенном на рис. 5. Устройство устанавливается на стол гидравлического пресса П479 силой 4 МН. На рис. 5 слева показано взаимное расположение деталей устройства в момент установки заготовки с оправкой в матрицу и создания давления жидкости в контейнере, а справа – взаимное расположение деталей в момент окончания деформации. Опора *1* скреплена со столом пресса, матрица *2* устанавливается в гнездо опоры и расточку канала контейнера. Контейнер *3* скреплен с опорой и установлен по оси пресса. Направляющая втулка *4* имеет пазы и отверстия для подвода сжатой жидкости и служит для центрирования заготовки *5* в матрице *2*. Плунжер *8* с помощью переходных деталей скреплен с ползуном пресса (не показано). Штуцер *10* снабжен уплотнениями и закреплен накидной гайкой в стенке контейнера. К штуцеру приваривается трубка, которая через вентиль соединяет полость контейнера с манометром высокого давления (не показано). Толкатель *12* скреплен с плунжером выталкивателя пресса.

Перед началом процесса гидроэкструзии осуществляются смазка поверхностей заготовки *5* и сборка трубы с оправкой *6*, на верхнюю часть которой устанавливают гайку *7*. Верхняя часть оправки *6* плотно установлена в трубу и герметизирует ее полость, а стержень оправки устанавливают в трубе с зазором.

Устройство работает следующим образом. В исходной позиции плунжер *8* поднят в верхнее положение, а толкатель *12* находится в нижнем положении. Смазанная заготовка *5* в сборе с оправкой *6* устанавливается на коническую поверхность матрицы *2*, затем в канал контейнера заливается рабочая жидкость *9* (индустриальное масло И20) до уровня, показанного на рис. 5 слева. Далее включают пресс и плунжер *8* перемещается на быстром ходу до момента входа в канал контейнера, после чего начинается рабочий ход со скоростью 2 мм/с. Давление жидкости в контейнере возрастает и начинается пластическая деформация заготовки.

Окончание процесса гидроэкструзии происходит в момент касания торца оправки *6* поверхности направляющей втулки *4* (см. рис. 5, справа). После этого плунжер поднимают в верхнюю позицию и включают выталкиватель пресса на ход вверх, при этом верхний торец толкателя *12* устанавливается немного выше калибрующего пояска матрицы, а деформированное изделие *11* с оправкой удаляется из матрицы.

Далее изделие с оправкой удаляют из контейнера, а масло остается в его полости, так как толкатель *12* предотвращает утечку масла. Затем в контейнер устанавливают новую заготовку с оправкой, доливают жидкость до необходимого уровня и после этого опускают выталкиватель в нижнее положение, при этом небольшой объем жидкости вытекает в направляющую толкателя.

Деформация второй и последующих заготовок и операции по извлечению второго и последующих изделий с оправками из контейнера выполняются точно так же, как при получении первого изделия. Для извлечения оправки *6* из изделия *11* ее хвостовик зажимается в тисках, затем вращением гайки *7* осуществляют удаление изделия с оправки.

Давление жидкости при гидроэкструзии трубы с заданной степенью деформации фиксировали по манометру высокого давления, имеющего диапазон измерений до 500 МПа, с точностью ± 5 МПа. В этих опытах вентиль, соединяющий полость контейнера с манометром, открывался. Одновременно можно наблюдать показания манометра пресса в момент установившегося процесса деформации и по их значениям вычислить силу, необходимую для гидроэкструзии трубы. Часть этой силы расходуется на преодоление трения в уплотнениях плунжера *8*. Если рассчитать силу для гидроэкструзии трубы на основании показаний манометра высокого давления и сопоставить ее с

силой, определенной по показаниям манометра пресса, то их разница составит величину силы, которая расходуется на преодоление трения в уплотнениях плунжера *8*.

Коэффициент вытяжки материала определяли по формуле $\lambda = F_0 / F_1$, где F_0, F_1 – площадь поперечного сечения заготовки до и после деформации. Трубная заготовка ∅8×1,5×100 мм имеет относительную толщину δ_0 = 1,5/8,0 = 0,187 и относительную длину l/D_0 = 100/8,0 = 12,5. Трубы с такими параметрами δ_0 и l/D_0 после деформации методами ротационного обжатия часто имеют дефекты в виде микротрещин даже при малых значениях коэффициента обжатия K = = 1,15, а при формоизменении методами прямого выдавливания и обжима наблюдается продольный изгиб и осадка заготовки.

Описанный выше процесс гидроэкструзии позволяет деформировать толстостенные, длинные трубы в достаточно широком диапазоне обжатий без появления микротрещин осадки и изгиба заготовок. При выполнении опытов для каждого значения ψ выполняли гидроэкструзию пяти заготовок, при этом в устройство устанавливали соответствующую матрицу, а в полости трубной заготовки размещали оправку нужного диаметра.

Для первой серии опытов установили матрицу с диаметром калибрующего пояска 7,0 мм и разместили в трубе оправку с диаметром стержня 4,0 мм. При выполнении опытов 2, 3 и 4-й серий устанавливали матрицы с диаметрами калибрующих поясков: 6,5; 6,0 и 5,5 мм, а в полостях заготовок размещали оправки с диаметрами стержней: 3,5; 3,0 и 2,5 мм. В опытах 5-й серии установили матрицу с диаметром калибрующего пояска 5,5 мм и разместили в трубе оправку с диаметром стержня 3,0 мм, при таком сочетании размеров матрицы и оправки при деформации происходит утонение стенки.

Результаты экспериментов приведены в таблице.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблице, показывает, что с увеличением степени деформации от 0,154 до 0,384 давление жидкости возрастает от 90 до 140 МПа.

На основании полученных данных построена диаграмма зависимости давления жидкости $p_ж$, необходимого для гидроэкструзии трубы (рис. 6). Как видно из рис. 6, наблюдается линейная зависимость давления жидкости от логарифма коэффициента вытяжки, при угле конуса матрицы 40°.

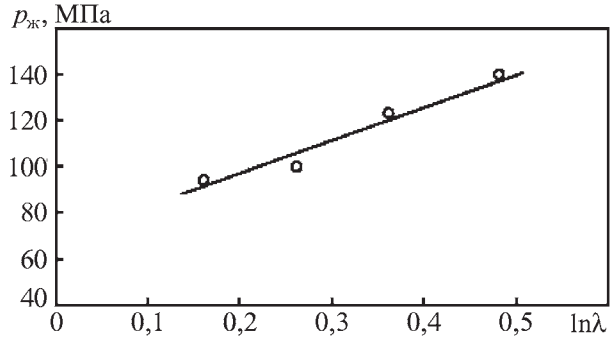


Рис. 6. Зависимость давления жидкости при гидроэкструзии от логарифма коэффициента вытяжки при угле конуса матрицы 40°

При достижении степени деформации 0,455 (см. таблицу) после заполнения материалом заготовки конической поверхности матрицы давление достигает критического значения $p_{кр}$ = 160 МПа и происходит сплющивание (смятие) трубной заготовки. Расчет критического давления по формуле (2) для титана марки ВТ1-0 в мягком состоянии, при значении предела текучести $\sigma_т$ = 330 МПа, дает близкие значения $p_{кр}$ = 330×ln8/5 = 155 МПа.

Трубчатые изделия, изготовленные гидроэкструзией в диапазоне степеней деформации 0,154...0,385, были тщательно осмотрены. Качество их деформированной поверхности оценивалось по следующим показателям: отсутствие микротрещин и задиров на внутренней поверхности, размеры и точность наружных диаметров и шероховатость наружной поверхности, размеры и точность внутренних диаметров и шероховатость внутренней поверхности, а также соосность деформированного участка изделия и недеформированного участка трубной заготовки.

При оценке качества внутренней поверхности использовали ультразвуковой контроль (УЗК) и металлографические исследования. УЗК выполняли по стандартной методике с использованием датчиков.

Результаты экспериментов

Размеры, мм		Степень деформации материала ψ	Коэффициент вытяжки λ	ln λ	Давление жидкости $p_ж$, МПа	Коэффициент обжатия, K
заготовки	деформированного участка					
∅8×1,5×100	∅7×1,5×50	0,154	1,18	0,166	90	1,143
	∅6,5×1,5×55	0,230	1,30	0,262	100	1,231
	∅6×1,5×60	0,308	1,44	0,365	123	1,333
	∅5,5×1,5×67	0,384	1,62	0,482	140	1,454
	∅5,5×1,25×76	0,455	1,84	0,609	160	1,454 (труба сплющилась)

Металлографические исследования проводили на шлифах, вырезанных из кольцевых образцов деформированной части изделия. Для металлографических исследований использовали микроскоп "Neophot" с увеличением 500...1000. У всех изделий по результатам УЗК и металлографических исследований дефектов в виде микротрещин и задиров не обнаружено.

Наружные диаметры деформированных участков изделий отличаются от диаметров матриц на величину упругой деформации +0,01...0,015 мм. Параметр шероховатости наружной поверхности *Ra*=0,8 мкм и практически совпадает с параметром шероховатости трубной заготовки. Параметры шероховатости *Ra* внутренней поверхности трубной заготовки деформированного участка изделия соответственно 3,2...1,2 и 1,62...0,8 мкм, следовательно, состояние внутренней поверхности улучшилось.

Внутренние диаметры деформированных участков изделий меньше соответствующих диаметров оправок на 0,01 мм. Соосность деформированного участка изделия и заготовки в пределах 0,1 мм.

Отметим, что в процессе гидроэкструзии автоматически осуществляется контроль материала трубы на отсутствие микротрещин при наружном давлении 90...140 МПа. Такое давление в 5–8 раз выше давления, при котором эксплуатируются трубчатые изделия.

Таким образом, процесс гидроэкструзии трубных заготовок обеспечивает повышение качества продукции по сравнению с методом ротационного обжатия, позволяет увеличить диапазон разовых обжатий и расширить номенклатуру изготовляемых изделий.

Ориентировочная производительность процесса 25–30 изделий в час с учетом времени вспомогательных операций по смазке и сборке заготовок с оправками, извлечения изделий с оправками из устройства и удаления оправок из изделий. Процесс можно использовать при изготовлении изделий мелкими и средними сериями.

Выводы

1. Методом конечных элементов выполнено теоретическое исследование процесса гидроэкструзии полых заготовок из титана, которое показало возможность создания достаточно мягкой схемы напряженного состояния при получении высокого уровня нагартовки металла.

2. Выполнены экспериментальные исследования процесса гидроэкструзии на подвижной оправке трубных заготовок из титана марки ВТ1-0, позволяющие изготовить изделия с переменным по длине сечением. Эти изделия имеют значительно меньшие размеры наружного и внутреннего диаметров деформированного участка, чем соответствующие диаметры заготовки.

3. Разработано устройство для гидроэкструзии трубчатых изделий на гидравлическом прессе силой 4 МН.

4. Процесс гидроэкструзии толстостенных труб по сравнению с методом ротационного обжатия обеспечивает более высокое качество деталей, позволяет увеличить диапазон разовых деформаций и расширить номенклатуру изготавливаемых изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Логинов Ю.Н., Каменецкий Б.И., Студенок Г.И.** Моделирование деформированного состояния круглой пластины при вытяжке // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 26–28.

Борис Исаакович Каменецкий, канд. техн. наук;
Юрий Николаевич Логинов, д-р техн. наук

М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, А.А. Носенко
(ЗАО "Уральский инжиниринговый центр", г. Челябинск)

Режимы работы штамповочного пресса НП-130 с модернизированной электрогидравлической системой управления

Приведена информация о возможностях управления подвижной траверсой штамповочного пресса НП-130 силой 300 МН после оснащения пресса модернизированной электрогидравлической системой управления.

The article includes information about capabilities of control by walking beam of forming press NP-130 by force 300 MN after equipping of press with modernized electric-hydraulic control system.

Ключевые слова: гидравлический штамповочный пресс; гидропривод подвижной траверсы; электрогидравлическая система управления; модернизация; режимы работы.

Key words: hydraulic forming press; hydraulic drive of walking beam; electric-hydraulic control system; modernizing; modes of operation.

В 2008 г. в плавильном цехе ОАО "Корпорация ВСМПО-АВИСМА" выполнен капитальный ремонт гидравлического штамповочного пресса НП-130 силой 300 МН. В процессе ремонта пресса проведена модернизация системы управления его подвижной траверсой.

Модернизированная система управления является электрогидравлической и обеспечивает перемещение подвижной траверсы пресса с заданной скоростью и минимальным перекосом относительно горизонтальной плоскости как во время рабочего хода (при этом регулирование осуществляется с помощью запорно-регулирующих напорных клапанов четырех рабочих гидроцилиндров), так и при подъеме и свободном опускании траверсы (в ходе указанных операций регулирование осуществляется посредством регулируемых дросселей четырех подъемных гидроцилиндров) [1].

В составе системы используются промышленный контроллер ControlLogix5561 и IBM PC-совместимый промышленный компьютер, укомплектованные стандартным и специальным программным обеспечением [2].

Для контроля текущих положения, скорости движения и углов наклона подвижной траверсы относительно продольной и поперечной горизонтальных осей используются датчики линейного перемещения четырех контрольных точек траверсы, расположенных в вершинах прямоугольника.

Поскольку положение плоскости в пространстве однозначно определяется положением трех ее точек, то нормальная эксплуатация пресса в принципе возможна при работе лишь трех (любых) из датчиков перемещения контрольных точек траверсы. В связи с этим на случай отказа одного из рассматриваемых датчиков предусмотрена возможность полномасштабной эксплуатации пресса с использованием трех датчиков, оставшихся исправными.

Вариант работы пресса с использованием четырех или трех датчиков перемещения контрольных точек подвижной траверсы устанавливается посредством одного из экранов панели оператора или компьютера. Для контрольной точки подвижной траверсы, датчик перемещения которой указан в качестве нерабочего, соответствующая координата определяется в контроллере расчетным путем на основании значений координат, соответствующих сигналам, поступающим от трех работающих датчиков контрольных точек подвижной траверсы (т.е. является вычисляемой величиной).

Управление каждым из регулирующих гидроаппаратов (клапанов и дросселей) гидропривода подвижной траверсы осуществляется с помощью индивидуального гидроцилиндра в общем случае в функции: 1) задающего сигнала, формируемого оператором посредством джойстика, расположенного на пульте управления пресса; 2) сигнала местной отрицательной обратной связи по положению запорно-регулирующего элемента данного регулирующего гидроаппарата; 3) сигнала главной отрицательной связи по отклонению текущей координаты контрольной точки подвижной траверсы от той координаты, которую эта точка должна занимать в текущий момент времени в соответствии с сигналом задания.

После проведенной модернизации работа пресса возможна в наладочном, ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах управления.

В наладочном режиме проводится проверка работы части гидравлической системы управления пресса, в которой в качестве рабочей жидкости используется минеральное масло. Данный режим допустим лишь при условии, что проходные сечения автоматического и отключающего клапанов закрыты, а подвижная траверса находится в нижнем положении или на твердом упоре.

В наладочном режиме предусмотрена возможность подачи управляющего электрического сигнала по отдельности (в любом сочетании) на каждый из гидроаппаратов (пропорциональных и направляющих гидрораспределителей, а также предохранительных клапанов) с электрическим управлением, включения и выключения приводящих электродвигателей насосов (соответственно загрузки и разгрузки насосов), реализовано автоматическое тестирование работы пропорциональных гидрораспределителей и приводов, построенных на их основе.

При работе пресса в режиме ручного управления все операции осуществляются по сигналам, подаваемым оператором (в пределах, допустимых блокировками). Подвижная траверса управляется джойстиком. При этом возможны три варианта работы с точки зрения регулирования скорости движения траверсы и обеспечения ее выравнивания (движения без перекоса):

1) с регулированием и выравниванием;
2) с регулированием без выравнивания;
3) без регулирования и без выравнивания.

При работе в режиме ручного управления с регулированием и выравниванием направление и величина отклонения ручки джойстика из нейтрального положения определяют необходимые направление (опускание или подъем) и скорость движения траверсы. В данном случае используется обратная связь по положению контрольных точек траверсы.

При работе в режиме ручного управления с регулированием без выравнивания направление и величина отклонения ручки джойстика из нейтрального положения определяют соответственно потребное направление движения подвижной траверсы (опускание или подъем) и величину задающего сигнала, подаваемого на электронный усилитель, управляющий соответствующим пропорциональным гидрораспределителем, и определяющего, в свою очередь, величину открытия проходного сечения напорного клапана или регулируемого дросселя. В указанном случае обратная связь по положению контрольных точек траверсы не используется.

При работе в режиме ручного управления без регулирования и без выравнивания при отклонении ручки джойстика из нейтрального положения вперед (от оператора) или назад (на оператора) на угол, превышающий некоторое установленное значение, осуществляются соответственно опускание или подъем тра-

версы с максимально возможной скоростью (т.е. в этом случае формируются управляющие сигналы, которым соответствует открытие проходных сечений регулируемых гидроаппаратов, используемых при выполнении текущей операции, на максимальную величину). В этом случае, как и в рассмотренном выше, обратная связь по положению контрольных точек траверсы также не используется.

При ручном управлении переход от свободного опускания траверсы к рабочему ходу может производиться автоматически (на основании контроля давления в рабочих полостях подъемных гидроцилиндров и дополнительно скорости опускания траверсы) или по дополнительному сигналу оператора, подаваемому с помощью специальной кнопки, расположенной на пульте управления пресса. Текущий вариант указанного перехода устанавливается (выбирается) оператором с использованием соответствующих экранов панели оператора или компьютера.

В рамках режима ручного управления существуют два специальных диагностических режима: режим проверки управляемости клапанов рабочих и подъемных гидроцилиндров и регулируемых дросселей; режим проверки герметичности клапанов рабочих гидроцилиндров.

Режим проверки управляемости клапанов рабочих и подъемных гидроцилиндров и регулируемых дросселей используется в тех случаях, когда возникают проблемы с перемещением запорно-регулирующих (запорных, регулирующих) элементов указанных гидроаппаратов (например, по окончании рабочего хода подвижной траверсы не закрывается проходное сечение напорного клапана рабочего гидроцилиндра при установке ручки управления джойстика в нейтральное положение или в положение, соответствующее подъему траверсы).

Данный режим позволяет осуществлять управление всеми клапанами и регулируемыми дросселями почти так же, как это управление осуществляется при ручном режиме управления работой пресса с регулированием без выравнивания (с той лишь разницей, что при этом исключается работа клапанов, соответствующая этапу свободного опускания траверсы).

Режим проверки управляемости клапанов рабочих и подъемных гидроцилиндров и регулируемых дросселей возможен только в том случае, если: установлен режим ручного управления, закрыты проходные сечения автоматического и отключающего клапанов пресса, работает насосная установка гидросистемы управления. Подвижная траверса пресса должна находиться на упоре (контроль за этим возлагается на оператора).

Для работы в режиме проверки управляемости клапанов и регулируемых дросселей необходимо нажать специальную кнопку на пульте управления пресса и, удерживая ее в нажатом состоянии, поперемещать ручку джойстика. При этом создаются предпосылки для удаления защемленных частиц загрязнений, препятствующих перемещению запорно-регулирующих (запорных, регулирующих) элементов клапанов и дросселей. Контроль перемещений запорно-регулирующих (запорных, регулирующих) элементов клапанов и дросселей может осуществляться с использованием экранов графиков и диагностики на панели оператора или дисплее компьютера.

Для анализа фактического состояния клапанных пар полезным является режим проверки герметичности клапанов рабочих гидроцилиндров. Данный режим также реализуется лишь при условии, что установлен режим ручного управления. Однако при этом проходные сечения автоматического и отключающего клапанов должны быть открыты. Должна также работать насосная установка гидросистемы управления. Подвижная траверса пресса должна находиться на упоре (контроль за этим возлагается на оператора), а ручка управления джойстика — в нейтральном положении.

Режим проверки герметичности клапанов рабочих гидроцилиндров реализуется при одновременном удержании в нажатом состоянии двух специальных кнопок на пульте управления пресса. При этом закрываются проходные сечения наполнительно-сливных клапанов рабочих гидроцилиндров. Проходные сечения напорных клапанов в рассматриваемой ситуации изначально должны быть закрыты. Наблюдая за изменением давления в полостях рабочих гидроцилиндров пресса, можно сделать заключение о том, закрылись ли на самом деле проходные сечения напорных клапанов, а также о том, насколько они герметичны (в предположении, что наполнительно-сливные клапаны являются герметичными).

При работе в полуавтоматическом режиме оператором задаются значения скоростей свободного опускания, рабочего хода и подъема траверсы, а также координата верхнего положения траверсы. При смещении ручки джойстика управления движением траверсы пресса из исходного (нейтрального) положения вперед (от оператора) на угол, превышающий некоторое установленное значение, осуществляется перемещение подвижной траверсы вниз с заданной скоростью свободного опускания и затем рабочего хода.

После осуществления предельной деформации заготовки траверса естественным образом тормозится и удерживается в опущенном неподвижном состоянии (при соединении полостей рабочих гидроцилиндров с напорной гидролинией пресса) до тех пор, пока оператор не вернет ручку джойстика в нейтральное положение (при этом проходные сечения напорных клапанов рабочих гидроцилиндров закрываются).

При смещении ручки джойстика управления движением траверсы пресса из нейтрального положения назад (на оператора) на угол, превышающий некоторое установленное значение, открываются проходные сечения наполнительно-сливных клапанов рабочих гидроцилиндров, закрывается проходное сечение сливного клапана и открывается проходное сечение

напорного клапана подъемных гидроцилиндров. В результате осуществляется перемещение подвижной траверсы вверх с заданной скоростью подъема до ее заданного верхнего положения, после чего траверса останавливается.

При работе в автоматическом режиме оператором задаются значения: скоростей свободного опускания, рабочего хода и подъема траверсы, координат верхнего и нижнего положений траверсы, времени выдержки траверсы в нижнем положении, предельно допустимой силы деформирования заготовки.

При смещении ручки джойстика управления движением траверсы пресса из нейтрального положения вперед (от оператора) на угол, превышающий некоторое установленное значение, осуществляются с соответствующими скоростями: перемещение подвижной траверсы вниз до ее остановки, выдержка траверсы в течение заданного отрезка времени в положении останова и затем автоматически подъем траверсы до ее заданного верхнего положения.

При возвращении ручки джойстика в исходное (нейтральное) положение траверса останавливается. При повторном смещении ручки джойстика управления движением траверсы пресса из нейтрального положения вперед (при работе в автоматическом режиме) происходит завершение прерванного ранее цикла движения траверсы.

Следует отметить, что при работе пресса в автоматическом режиме предусмотрено два варианта остановки подвижной траверсы в конце рабочего хода: 1) нефиксируемый (при этом траверса останавливается естественным путем из-за возрастания сил сопротивления ее движению до величины движущей силы и во время выдержки может изменять свое положение вследствие течения металла заготовки и дополнительной деформации последней); 2) фиксируемый по положению (при этом оператором задается координата остановки подвижной траверсы в конце рабочего хода и во время выдержки данное положение траверсы поддерживается с точностью ± 1 мм).

Если задано ненулевое значение предельно допустимой (максимальной) силы деформирования заготовки (силы штамповки), то при увеличении до указанного значения результирующей силы, создаваемой рабочими и подъемными гидроцилиндрами в процессе рабочего хода подвижной траверсы, автоматически происходит остановка подвижной траверсы (даже если не достигнута заданная координата остановки подвижной траверсы в конце рабочего хода). Таким образом (в случае необходимости) исключается перегрузка штампов и ограничивается сила деформирования заготовки.

Работа в полуавтоматическом и автоматическом режимах всегда осуществляется с использованием обратной связи по положению контрольных точек траверсы (т.е. с регулированием и выравниванием) и автоматическим переходом со свободного опускания траверсы к рабочему ходу (на основании контроля давления в рабочих полостях подъемных гидроцилиндров и дополнительно скорости опускания траверсы).

С точки зрения возможностей доступа пользователей к программному обеспечению верхнего уровня системы управления пресса реализованы три уровня: "Оператор", "Наладчик" и "Администратор". По умолчанию после загрузки (перезагрузки) компьютера автоматически устанавливается уровень доступа "Оператор". При работе на этом уровне пользователю доступны все экраны, кроме экранов настроек и архива аварийных сообщений.

Переход к уровням доступа "Наладчик" и "Администратор" осуществляется с использованием соответствующих паролей. Пользователь с правами доступа "Администратор" не имеет каких-либо ограничений по работе с экранами и архивами, а пользователь с правами доступа "Наладчик" не имеет права доступа к экранам настройки регуляторов пресса.

Внедрение модернизированной электрогидравлической системы управления пресса НП-130 расширило возможности управления прессом, привело к улучшению условий труда оператора пресса и обслуживающего персонала, к повышению производительности пресса и качества производимой на нем продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М. Выбор значений коэффициентов обратной связи электрогидравлической системы управления подвижной траверсой штамповочного пресса на этапе проектирования // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 3. С. 22–30.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615625 (RU). Управление гидравлическим штамповочным прессом с обеспечением перемещения подвижной траверсы без перекосов / В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, М.Е. Гойдо, А.А. Носенко, А.М. Анодин, А.А. Досин. 2008.

Максим Ефимович Гойдо, канд. техн. наук;
Валерий Владимирович Бодров, канд. техн. наук;
Рамиль Мерсеитович Багаутдинов, генеральный директор;
Антон Александрович Носенко, инженер-программист

УДК 532.516.5:621.746.047

В.В. Стулов, В.И. Одиноков, В.В. Черномас, А.А. Дербеткин, С.С. Макаров
(Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)

Технология получения непрерывно-литых деформированных заготовок из сплава Pb–Sb на модернизированной установке

Выполнена разливка труднодеформируемого свинцово-сурьмянистого сплава на модернизированной конструкции кристаллизатора лабораторной установки. Получена качественная без трещин заготовка, определены значения коэффициента теплопередачи стенки кристаллизатора, толщина корочки заготовки и степень ее обжатия.

The teeming of hard-deformed Pb–Sb alloy was realized on mold of laboratory-scale plant with new design. The high-guality crackless billet was got, and the heat transfer coefficient of mold wall, thickness and percent reduction of billet skin was finded.

Ключевые слова: труднодеформируемые сплавы; стенки кристаллизатора; охлаждение; тепловой поток; уровень заливки.

Key words: hardly-deformed alloys; mold walls; cooling; thermal current; cast level.

В работе [1] приведены результаты получения непрерывно-литых деформированных заготовок на лабораторной установке литейно-ковочного модуля (ЛКМ) при различных расходах охлаждающей воды через прямоточные каналы и уровнях заливки расплава. Недостатки выполненной работы заключаются в возможности поломки кристаллизатора при заливке расплава выше определенного уровня и недостаточной эффективности применяемой системы охлаждения наклонных и вертикальных стенок.

В настоящей работе ставилась цель разливки Pb–Sb-сплава в модернизированном кристаллизаторе, предотвращающем вероятность его поломки при заливке расплава выше определенного уровня. Охлаждение производилось только верхних участков наклонных в верхней части стенок без охлаждения вертикальных стенок.

На рис. 1 приведена схема стального кристаллизатора установки ЛКМ. Кристаллизатор состоит из стенок *1* с наклонными в верхней части охлаждаемыми участками *2*, в которых выполнены сверления *3* и установлены медные трубки *4* с заглушенным концом и дополнительной трубкой *5*, вертикальных неохлаждаемых калибровочных участков *6* с термопарой *7*, вертикальных неохлаждаемых стенок *8* с термопарой *9*.

Выполненные в наклонных в верхней части стенках сверления на различную глубину (H_1 = 0,075 м и H_2 = 0,1 м) позволяют определить дополнительные нагрев охлаждающей воды и величину теплового потока, передаваемого от заготовки в стенку.

Предварительно, перед работой кристаллизатора ЛКМ, между вертикальными неохлаждаемыми калибровочными участками *6* устанавливается затравка, предотвращающая выливание расплава, и включается подача охлаждающей воды в трубку *5*, которая охлаждает медную трубку *4*. В кристаллизатор подается расплав. После достижения заданного уровня заливки расплава включается привод кристаллизатора. В результате наклонные стенки обеспечивают обжатие корочек заготовки и калибрование ее поверхности, а вертикальные – обеспечивают выталкивание заготовки из кристаллизатора.

Параметры стальных стенок кристаллизатора лабораторной установки ЛКМ:

– вертикальная стенка, 10^{-3} м: толщина $c_в$ = 22; ширина $b_в$ = 80; высота $H_в$ = 170;

– наклонная в верхней части стенка, 10^{-3} м: толщина c = 100; ширина b = 28; высота $H_н$ = 150.

В выполненные сверления (H_1 = 0,075 м и H_2 = = 0,1 м) диаметром $d = 12 \cdot 10^{-3}$ м установлены без зазора медные трубки *5* внутренним диаметром $d_в$ = $= 8 \cdot 10^{-3}$ м с заглушенным концом. В медную трубку на всю глубину вставляется трубка *4* диаметром d_1 = $= 2{,}0 \cdot 10^{-3}$ м, через которую подводится охлаждающая вода. Для вытекания воды конец трубки срезан под углом 45°. Расход охлаждающей воды в каждой стенке

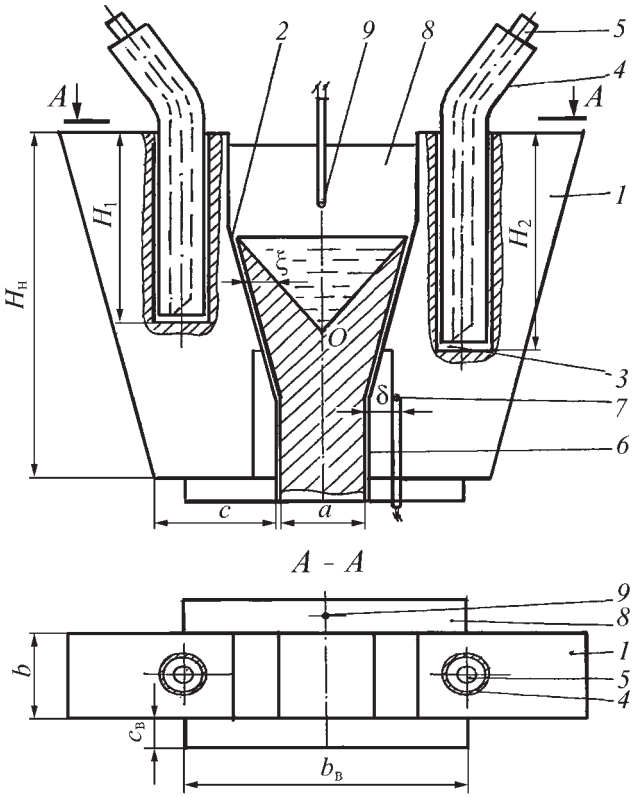


Рис. 1. Схема кристаллизатора установки ЛКМ

$\dot{v}$ = 0,0195 м^3/ч. Начальная температура охлаждающей воды $t_в$ = 10 °С.

Параметры процесса разливки свинцово-сурьмянистого сплава с содержанием сурьмы 5 %: температура разливки t_0 = 315 °С, средняя скорость разливки непрерывных заготовок v = 0,67 м/мин; сечение получаемой заготовки $a\times b$ = 6,5×28 мм; массовый секундный расход расплава в кристаллизатор M = = 23,05·10^{-3} кг/с. Подвод расплава в кристаллизатор осуществлялся струей диаметром 2·10^{-3} м. Длина полученной непрерывно-литой деформированной заготовки l = 1,7 м.

В процессе разливки расплава постоянно фиксировали температуру наклонной в верхней части стенки на расстоянии 8 мм от поверхности, температуру в верхней части вертикальной стенки на расстоянии 10 мм от поверхности, а также температуру охлаждающей воды на выходе из наклонных в верхней части стенок. Термопары устанавливали на высоте, соответствующей зоне обжатия корочек заготовки. Теплофизические параметры воды и сплава определяли из справочной литературы [2, 3].

Результаты исследований. На рис. 2 приведены зависимости температуры охлаждающей воды от времени разливки расплава, на рис. 3 – зависимости температуры наклонной в верхней части стенки и вертикальных стенок кристаллизатора в точках установки термопар от времени. На рис. 2 видно, что в одной наклонной части стенки максимальное значение температуры охлаждающей воды $t_в$ = 15 °С наблюдается через 150 с с момента заливки расплава, а в другой – 17 °С.

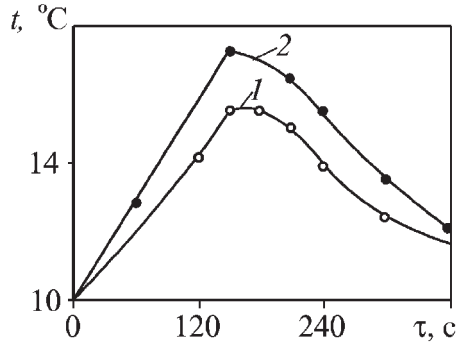


Рис. 2. Зависимости температуры охлаждающей воды на выходе из наклонных частей стенок кристаллизатора от времени разливки свинцово-сурьмянистого сплава:
1 – на выходе из первой стенки; *2* – на выходе из второй стенки

Из рис. 3 следует, что максимальное значение температуры неохлаждаемой вертикальной стенки в точке установки термопары достигает 65 °С, а наклонной в верхней части стенки – 85 °С.

Тепловой поток, отводимый охлаждающей водой от наклонной в верхней части стенки, определяется по формуле

$$Q_н = c_m \dot{m} \Delta t, \qquad (1)$$

где c_m = 4189 Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость охлаждающей воды; $\dot{m}$ = 5,4·10^{-3} кг/с – массовый секундный расход воды в трубке; Δt = 5 °С – перепад температур охлаждающей воды в стенке.

После подстановки в приведенную формулу исходных данных получаем $Q_{н1}$ = 113,1 Вт и $Q_{н2}$ = = 146,6 Вт. При площади поверхности теплообмена охлаждаемой водой медной трубки F_1 = 0,176·10^{-2} м^2 и F_2 = 25,12·10^{-4} м^2, контактирующей с наклонной в верхней части стенкой, получаем средние значения плотностей тепловых потоков $q_{н1}$= 64,2·10^3 Вт/м^2 и $q_{н2}$= 58,4·10^3 Вт/м^2. Тепловой поток, отводимый охлаждающей водой в двух наклонных в верхней части

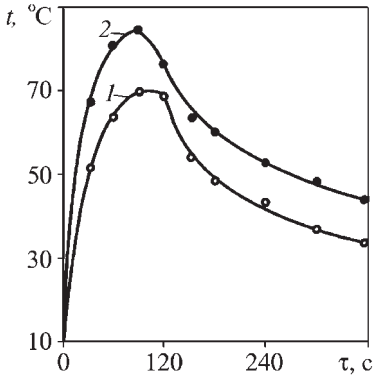


Рис. 3. Зависимости температуры стенок кристаллизатора от времени разливки свинцово-сурьмянистого сплава:
1 – вертикальная неохлаждаемая стенка; *2* – наклонная в верхней части стенка

стенках $Q_н \approx 260$ Вт. Сравним полученное значение теплового потока с теплотой перегрева сплава и теплотой, выделяющейся при его кристаллизации.

Теплота перегрева сплава определяется по формуле

$$Q_п = c\dot{M}(t_0 - t_k), \quad (2)$$

где c = 142 Дж/(кг·К) – теплоемкость сплава; $\dot{M}$ = = $23{,}05 \cdot 10^{-3}$ кг/с – расход сплава; t_0 = 315 °С – температура разливки сплава; t_k = 300 °С – температура начала затвердевания сплава, определяемая из литературы [4].

После подстановки в приведенную формулу исходных данных получаем $Q_п$ = 49,1 Вт. Теплота, выделяющаяся в процессе кристаллизации сплава, равняется Q_r = 530 Вт. В результате общий тепловой поток, который необходимо отвести в кристаллизаторе, равен Q_0 = 579 Вт. При времени разливки τ =150 с получаем Q_0' = 86 870 Дж.

Сравнение полученного значения Q_0 со значением теплового потока, отводимого охлаждающей водой в двух наклонных в верхней части стенках, показывает, что расхождение составляет ΔQ = 319 Вт. При времени разливки τ = 150 с получаем ΔQ = 47 850 Дж. Этот тепловой поток затрачивается на разогрев стенок кристаллизатора.

Общее количество теплоты, затрачиваемое на разогрев всех стенок в зоне контакта с заготовкой, определяется по формуле

$$Q_с = cm(\bar{t}_k - t_н), \quad (3)$$

где c = 460 Дж/(кг·К) – теплоемкость материала стенок (среднеуглеродистая сталь); m – масса стенок в зоне контакта с заготовкой; $\bar{t}_k$ – средняя температура стенки; $t_н$ = 10 °С – начальная температура стенок кристаллизатора.

Для наклонной в верхней части стенки при $m_н$ = = 0,557 кг, $\bar{t}_k$ = 70 °С по формуле (3) получаем $Q_н = 15{,}4 \cdot 10^3$ Дж.

Для вертикальной стенки при $m_в$ = 0,386 кг, $\bar{t}_k$ = = 60 °С по формуле (3) получаем $Q_в = 8{,}88 \cdot 10^3$ Дж.

В результате общее количество теплоты, затрачиваемое на разогрев стенок кристаллизатора в зоне контакта с заготовкой, равно $Q_с'$ = 48 560 Дж. В действительности в стенки выделяется большее количество теплоты $Q_с' > 48\,560$ Дж, которое распространяется теплопроводностью материала стенок за пределы зоны контакта с заготовкой. Сравнение полученного значения $Q_с$= 48 560 Дж со значением $Q_с$ = = 47 850 Дж показывает, что при скорости разливки расплава 0,67 м/мин и охлаждении только двух наклонных в верхней части стенок кристаллизатора вся теплота перегрева и кристаллизации расплава отводится в кристаллизаторе.

При охлаждении сплава с содержанием сурьмы 5 % при t = 300 °С из жидкого раствора выпадают кристаллы чистого свинца. По мере дальнейшего понижения температуры выделяются новые кристаллы чистого свинца и в остающейся жидкой части сплава будет возрастать содержание сурьмы [4]. Ниже температуры t = 246 °С происходит окончательное охлаждение затвердевшего сплава.

Рассмотрим теплообмен в наклонной в верхней части стенки кристаллизатора.

При площади проходного сечения медной трубки $F = 0{,}471 \cdot 10^{-4}$ м^2 и секундном расходе охлаждающей воды $\dot{v} = 5{,}41 \cdot 10^{-6}$ м^3/с получаем значение скорости воды в кольцевом зазоре $\omega_в$ = 0,11 м/с.

При средней температуре охлаждающей воды $\bar{t}_в$ = = 12,5 °С: ρ = 999 кг/м^3; $\mu = 1230 \cdot 10^{-6}$ Па·с; λ = 0,568 Вт/(м·К); $\nu = 1{,}23 \cdot 10^{-6}$ м^2/с [2].

Значение критерия Рейнольдса воды в трубке определим по выражению

$$\mathrm{Re} = \omega_в d_э / \nu,$$

где $d_э = 6 \cdot 10^{-3}$ м – эквивалентный диаметр.

После подстановки в приведенное выражение исходных данных получаем значение Re = 540. При соотношении меньшего и большего диаметров трубок 0,25, установленных для подвода и отвода воды в наклонной в верхней части стенки и при вязкостном течении воды в кольцевом сечении получаем значение критерия Нуссельта Nu = 8 [2]. Из выражения

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_в d_э}{\lambda}$$

определим значение коэффициента теплоотдачи воды $\alpha_в$ в кольцевом сечении. Получаем $\alpha_в$ = 757 Вт/(м^2·К).

Температуру поверхности медной трубки $t_т$, установленной внутри наклонной в верхней части стенки и охлаждаемой водой, определим из формулы

$$q = \alpha_в (t_т - t_в). \quad (4)$$

После подстановки в формулу (4) исходных данных получаем $t_т$ = 97 °С.

Из выражения для плотности теплового потока через стенку кристаллизатора к охлаждающей воде, состоящую из двух плотно прилегающих друг к другу слоев стали и медной трубки

$$q = \frac{t_1 - t_т}{\dfrac{\delta_с}{\lambda_с} + \dfrac{\delta_м}{\lambda_м}} \quad (5)$$

определим значение температуры t_1 на поверхности стальной стенки, контактирующей с заготовкой.

В выражении (5) $q = 64{,}2 \cdot 10^3$ Вт/м^2 – плотность теплового потока; $\delta_с = 6 \cdot 10^{-3}$ м – толщина стальной стенки; $\delta_м = 2 \cdot 10^{-3}$ м – толщина стенки медной труб-

ки; $\lambda_с$ = 50 Вт/(м·К) – теплопроводность материала стенки кристаллизатора; $\lambda_м$ = 385 Вт/(м·К) – теплопроводность медной трубки.

После подстановки в формулу (5) исходных данных получаем значение температуры на поверхности стальной стенки t_1 = 105 °С.

Для наклонной в верхней части стенки ниже верхнего охлаждаемого участка при температуре стенки t = 85 °С (см. рис. 3) на расстоянии $\delta = 8\cdot10^{-3}$ м от поверхности из закона Фурье

$$q = \frac{\lambda}{\delta}\Delta t, \qquad (6)$$

где $\Delta t = t_1 - t$ – перепад температур в стенке, определим значение температуры t_1 на поверхности стенки. После подстановки в формулу (6) исходных данных получаем t_1 = 95 °С. Сравнение полученного по формуле (6) значения t_1 = 95 °С со значением t_1 = 105 °С, полученным по формуле (5), показывает, что расхождение не превышает 9,5 %.

Для определения коэффициента теплопередачи конструкции кристаллизатора необходимо знать коэффициент теплопередачи в контакте горячей заготовки со стенкой кристаллизатора. В работе [2] приведены значения коэффициентов теплопередачи контактирующих материалов. В рассматриваемом процессе получения деформированной заготовки удельная нагрузка превышает 10 МПа, так как происходит деформация свинцовой заготовки при t = 10 °С, для которой значение напряжения $\sigma_т = 10^6$ Н/м^2. Тогда значение коэффициента теплопередачи заготовки со стенкой кристаллизатора равняется $\alpha = 120\cdot10^3$ Вт/(м^2·К) [2].

Коэффициент теплопередачи конструкции кристаллизатора определим по выражению [2]

$$k = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_с}{\lambda_с} + \frac{\delta_м}{\lambda_м} + \frac{1}{\alpha_в}\right)^{-1}. \qquad (7)$$

После подстановки в выражение (7) исходных данных получаем значение k = 687,5 Вт/(м^2·К). Из выражения (7) следует, что для увеличения k без изменения остальных параметров необходимо увеличить значение коэффициента теплоотдачи воды $\alpha_в$.

Тепловой поток, передаваемый от заготовки в охлаждаемой части наклонных стенок кристаллизатора, определим по выражению

$$Q = kF(t_з - t_в), \qquad (8)$$

где $F = 7{,}04\cdot10^{-4}$ м^2 – среднее значение площади поверхности теплообмена заготовки с охлаждаемой частью одной наклонной в верхней части стенкой кристаллизатора; $t_з$ = 300 °С – среднее значение температуры заготовки в верхней части кристаллизатора; $\bar{t}_в$ = 12,5 °С – среднее значение температуры охлаждающей воды.

После подстановки в выражение (7) исходных данных получаем Q_1 = 139 Вт. Тепловой поток, передаваемый от заготовки на две наклонные в верхней части стенки, Q_2 = 278 Вт. Сравнение этого значения с тепловым потоком, отводимым охлаждающей водой в двух наклонных в верхней части стенках $Q_н$ = 260 Вт, показывает, что расхождение не превышает 6,5 %.

В заключение определим толщину корочки заготовки и степень ее обжатия в зависимости от уровня заливки расплава.

Толщину корочки деформируемой заготовки в зависимости от уровня заливки сплава определим по формуле

$$\xi = \beta\sqrt{\tau}, \qquad (9)$$

где $\beta = \sqrt{\frac{\lambda}{r\rho}}\sqrt{t_k - t_1}$ – коэффициент затвердевания сплава; $\tau = H / v$ – время разливки заготовки; λ – теплопроводность сплава.

При теплофизических параметрах сплава [2, 3]: λ = = 15,5 Вт/(м·К); $r = 23\cdot10^3$ Дж/кг; ρ = 11 340 кг/м^3; t_k = 300 °С и t_1 = 105 °С получаем значение β = = $3{,}416\cdot10^{-3}$ м/с^{0,5}.

Результаты расчета по формуле (9) толщины корочки деформируемой заготовки в зависимости от уровня заливки расплава приведены в табл. 1. По полученным результатам расчета толщины корочки сплава по выражению $\varepsilon = (2\xi - a) / 2\xi$ определяется степень обжатия заготовки толщиной $a = 6{,}5\cdot10^{-3}$ м. Результаты расчета ε также приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что для получения качественной структуры деформированной заготовки уровень заливки расплава должен превышать $H > (15...20)\cdot10^{-3}$ м. Максимальное значение ε = 0,645 обеспечивается при H = 0,08 м.

В табл. 2 приведены значения толщины получаемой заготовки в зависимости от ее длины. Из табл. 2 следует, что максимальное значение толщина заготовки $a = 7{,}6\cdot10^{-3}$ м имеет в начале разливки в непрогретый кристаллизатор, а минимальное значение $a = 6{,}1\times10^{-3}$ м – в конце разливки. На участке длины

1. Толщины корочки сплава заготовки и степени ее обжатия при различном уровне заливки расплава

$H\cdot10^3$, м	5	10	15	20	25	30	40	50	80
$\xi\cdot10^3$, м	2,29	3,23	4,00	4,58	5,12	5,60	6,46	7,24	9,15
ε	–	–	0,188	0,29	0,365	0,42	0,50	0,551	0,645

2. Распределение толщины отлитой заготовки по ее длине

l, м	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$a \cdot 10^3$, м	7,6	7,4	6,9	6,7	6,8	6,5	6,4	6,5	6,6	6,4	6,5	6,6	6,5	6,5	6,2	6,1	6,2	6,1

$l = 0{,}4...1{,}2$ м после прогрева стенок кристаллизатора изменение толщины заготовки не превышает 1,5 % от ее среднего значения $\bar{a} = 6{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

Шлифы сплава Pb–Sb травили в реактиве. Наклепанный слой удалялся в течение 10...15 мин с последующей легкой полировкой. Для осветления шлифов использовали концентрированную соляную кислоту. Металлографический анализ образцов производили на микроскопе НЕОФОТ-21. В направлении деформации чередуются темные полоски эвтектики шириной 5 мкм. Зерна свинца вытянуты в направлении деформации и имеют размеры 5...20 мкм. Твердость заготовок из Pb–Sb сплава достигает 14 НВ.

Выводы

1. На основании результатов разливки труднодеформируемого свинцово-сурьмянистого сплава в стальной кристаллизатор лабораторной установки ЛКМ показана возможность получения качественных непрерывно-литых деформированных заготовок при отсутствии охлаждения вертикальных стенок и охлаждении только верхних участков наклонных в верхней части стенок.

2. Усовершенствованное охлаждение только верхних участков наклонных в верхней части стенок показывает возможность использовать в дальнейшем для этой цели двухфазные термосифоны.

3. Модернизация конструкции стенок кристаллизатора предотвращает вероятность его поломки при заливке расплава выше определенного уровня и повышает эффективность выталкивания заготовки.

4. Результаты выполненных исследований были использованы при определении параметров процесса разливки и охлаждения стали на модернизированной опытно-промышленной установке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

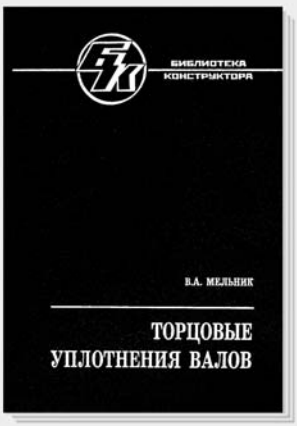
1. **Стулов В.В.** Исследование режимов непрерывной разливки труднодеформируемых сплавов Pb – Sb в кристаллизатор при получении профильных заготовок // Металлы. 1999. № 3. С. 51 – 55.

2. **Тепло- и массообмен**. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др. М.: Энергоатомиздат, 1982. 512 с.

3. **Зиновьев В.Е**. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. М.: Металлургия, 1989. 384 с.

4. **Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П**. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1980. 492 с.

Вячеслав Викторович Стулов, д-р техн. наук;
Валерий Иванович Одиноков, д-р техн. наук;
Вадим Владимирович Черномас, д-р техн. наук;
Александр Анатольевич Дербеткин, инженер;
Сергей Сергеевич Макаров, инженер



Мельник В.А. **Торцовые уплотнения валов**: справочник. (Библиотека конструктора). 2008. – 320 с., тв. пер., 70×100 1/16
ISBN 978-5-217-03383-6
Цена с НДС 484 руб.

Приведен механизм работы торцовых уплотнений, включая процессы, протекающие в уплотняющей щели, гипотезы уплотняющей и несущей способности торцовых уплотнений и известные методы их расчета. Представлены новые сведения по исследованиям и расчетам торцовых уплотнений, управлению работой торцового уплотнения и связанными с этим возможностями расчетного проектирования торцовых уплотнений с заданными рабочими характеристиками. Приведены технические решения, которые могут успешно использоваться в конструкторской практике.

Впервые даны конструктивные исполнения газовых торцовых уплотнений, описание их работы, необходимое дополнительное оборудование, наиболее распространенные схемы и методы расчета уплотняющих пар.

Для специалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией узлов уплотнений валов, может быть полезна преподавателям и студентам втузов.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел подписки, маркетинга и рекламы по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение".
Справки по тел. (499) 269-66-00.
http://www.mashin.ru

УДК 621.778

Г.Н. Гурьянов *(ООО "Феникс +", г. Белорецк)*,
Б.А. Коломиец *(ОАО «ММК – МЕТИЗ»)*,
Г.В. Баталов *(ООО ТД "Уралкран", г. Челябинск)*,
В.Я. Киселёв *(ОАО "ВНИИМетиз" », г. Магнитогорск)*

Механические свойства углеродистой канатной проволоки при низкой температуре*

Приведены результаты испытаний на растяжение и кручение углеродистой проволоки при температуре +20 и –55 °С. Для изготовления проволоки использовали заготовки разных диаметров из сталей 65 КК, 65Г и 70.

Results of tension and torsion tests of carbonaceous wire at temperature +20 and –55 °C are resulted. Blanks of different diameters made of steels 65 KK, 65G and 70 for wire manufacturing are used.

Ключевые слова: проволока; деформация; растяжение; кручение; низкие температуры; прочность; пластичность.

Key words: wire; deformation; tension; torsion; low temperatures; durability; plasticity.

Освоение Севера требует производства хладостойких метизных изделий, в том числе стальных канатов.

В целях исследования сравненивали качество образцов из проволоки диаметром 1,80 мм из стали марки 70 (ТУ 14-1-1881–76) и проволоки диаметром 1,66 мм, взятой из импортного каната (Канада), предназначенного для работы в условиях Севера. Образцы проволоки имели близкие значения временного сопротивления разрыву $\sigma_в$ = 1770 МПа (180 кгс/мм^2).

При комнатной и отрицательной температуре замеряли максимальную нагрузку растяжения (сила разрыва) проволоки P_b, диаметр шейки в месте разрушения для определения степени деформации сдвига металла в момент разрушения (пластичности) по формуле [1]:

$$\Lambda = 2\sqrt{3}\ln(d_0 / d_ш),$$

где d_0, $d_ш$ – диаметр проволоки до испытания и в минимальном сечении шейки разрушенного образца соответственно.

На рис. 1 приведена схема испытания проволоки на растяжение при отрицательной температуре, а на рис. 2 – общий вид установки для низкотемпературного растяжения образцов.

Проволочный образец *1* зажимается в захватах *2* разрывной машины (универсальная машина ЦД-10 производства бывшей ГДР, г. Лейпциг). Образец с захватами помещен в камеру охлаждения – криокамеру *3*, состоящую из двух коаксиальных цилиндров. Пространство между цилиндрами заполнено теплоизоляционной набивкой.

Криокамера сообщена с дополнительной камерой *4*, предназначенной для замера температуры ртутным термометром *5*. Охлаждающая жидкость с помощью электронасоса *6* поступает в циркуляционный термостат *7*, а затем в холодильный теплообменник *8*, где происходит охлаждение хладоносителя – спирта. В теплообменнике *8* готовится раствор твердой углекислоты в ацетоне.

Схема установки для испытания проволочных образцов на кручение при низкой температуре приведена на рис. 3.

При исследованиях использовали оборудование для испытания на скручивание проволоки (2048 МТС) и изготовленное приспособление, позволяющее осуществлять деформацию при отрицательной температуре.

Корпус камеры охлаждения *1* представляет двухслойный цилиндр. В корпусе имеются отверстия для установки проволочного образца *2*. Для предотвращения протекания охлаждающей жидкости из камеры охлаждения установлены уплотнения *3*. Камера охла-

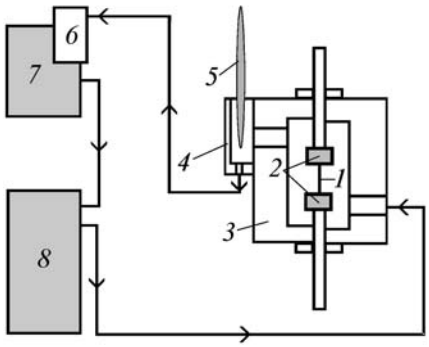


Рис. 1. Схема испытания проволочных образцов на растяжение при отрицательной температуре:
1 – образец; *2* – захваты разрывной машины; *3* – криокамера; *4* – дополнительная камера; *5* – термометр; *6* – электронасос; *7* – термостат; *8* – теплообменник

* Работа выполнена при участии сотрудников ОАО "ВНИИМетиз" В.Е. Гуленкина, В.М. Литвиновой

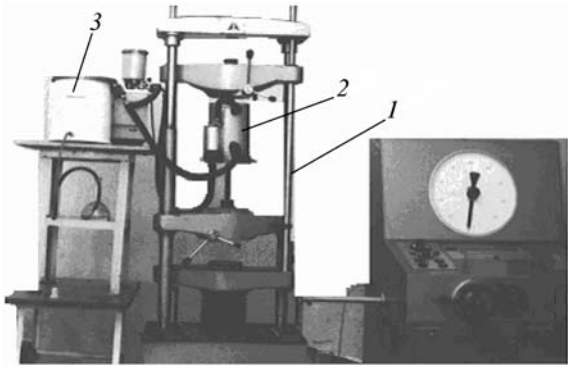


Рис. 2. Общий вид установки для низкотемпературных испытаний проволоки на растяжение:
1 – универсальная машина ЦД-10 для проведения испытаний на растяжение; *2* – криокамера с испытуемым проволочным образцом; *3* – теплообменник

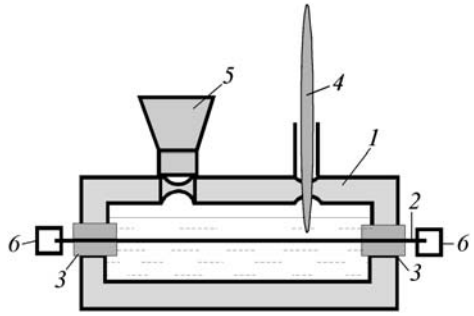


Рис. 3. Схема испытания проволочных образцов на кручение при низкой температуре:
1 – камера охлаждения; *2* – образец; *3* – уплотнение; *4* – термометр; *5* – воронка для ввода охлаждающей жидкости; *6* – захваты испытательной машины

ждения включает также термометр *4* и воронку *5* для ввода охлаждающей жидкости. Концы образца зажимаются в захватах *6* испытательной машины.

Средняя температура испытаний на растяжение и кручение составила –54 °С. Число гибов проволоки до разрушения определяли только при комнатной температуре.

В табл. 1 и 2 приведены результаты испытаний опытной и импортной проволоки на растяжение, кручение и знакопеременный перегиб (средние значения величин при положительной и отрицательной температурах имеют верхний индекс $^{+-}$).

Поскольку прочностные свойства опытной и импортной проволоки одинаковые, оценим уровень качества образцов проволоки по числу скручиваний и гибов до разрушения и пластичности при растяжении Λ.

Примем равными значения весовых коэффициентов при показателях $\overline{n}_{скр}^{+-}$ $n_{гибы}$ и $\overline{\Lambda}^{+-}$: $q_1 = q_2 = q_3 = 0{,}33$.

Относительный средневзвешенный показатель качества опытной проволоки будет равен

$$Y = 0{,}33\frac{39}{46} + 0{,}33\frac{18}{20} + 0{,}33\frac{1{,}85}{1{,}41} = 1{,}0;$$

где 39; 18 и 1,85 – показатели качества соответственно $\overline{n}_{скр}^{+-}$, $n_{гибы}$ и $\overline{\Lambda}^{+-}$ для опытной проволоки; 46; 20 и 1,41 – показатели качества соответственно $\overline{n}_{скр}^{+-}$, $n_{гибы}$ и $\overline{\Lambda}^{+-}$ для импортной проволоки.

При расчете в качестве базового образца взята импортная проволока. Величина $Y = 1$ показывает примерно равный уровень качества сравниваемых вариантов изготовления проволоки.

Необходимо отметить, что данные при кручении получены на образцах одинаковой длины 320 мм. Это ставило образцы опытной проволоки, имеющей большее сечение, в более жесткие условия испытания для получения одинакового числа скручиваний.

Также исследовали влияние низкой температуры на максимальную нагрузку растяжения и число скручиваний до разрушения проволоки из сталей 65Г и 65 КК.

1. Результаты механических испытаний на растяжение опытной и импортной проволоки при положительной и отрицательной температурах

Проволока	Сила разрыва, Н			Диаметр шейки, мм		Степень деформации сдвига			
	P_b^+	P_b^-	P_b^-/P_b^+	$d_ш^+$	$d_ш^-$	Λ^+	Λ^-	$\overline{\Lambda}^{+-}$	Λ^+/Λ^-
Опытная ∅ 1,80 мм	4560 4560 4570	4830 4830 4850	1,061	1,12 1,16 1,10	1,08 1,07 1,10	1,78	1,91	1,85	0,932
Импортный аналог ∅ 1,66 мм	4100 4000 3850	4300 4280 4200	1,069	1,10 1,10 1,10	1,10 1,10 1,15	1,42	1,39	1,41	1,022

2. Результаты механических испытаний на кручение и перегиб опытной и импортной проволоки (средние значения)

Проволока	Число скручиваний $n_{скр}$				Число гибов $n_{гибы}$
	$n_{скр}^+$	$n_{скр}^-$	$n_{скр}^+/n_{скр}^-$	$\overline{n}_{скр}^{+-}$	
Опытная ∅ 1,80 мм	61	18	3,39	39	18
Импортный аналог ∅ 1,66 мм	62	30	2,07	46	20

3. Фактический химический состав (% мас.) сталей, применяемых для изготовления проволоки

Элемент	Марка стали			
	70 (ТУ 14-11881–76)	65Г (ГОСТ 14959–79)	65 КК (ОСТ 14-15-37–65)	Импортный аналог (Канада)
C	0,70...0,74	0,62...0,70	0,65...0,70	0,65...0,69
Mn	0,30...0,70	0,90...1,20	0,40...0,70	0,56...0,80
Si	0,25...0,37	0,17...0,37	0,25...0,45	0,12...0,26
S	< 0,015	< 0,025	< 0,030	0,007...0,009
P	< 0,015	< 0,025	< 0,030	0,016...0,023
Cr	< 0,05	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Ni	< 0,05	< 0,15	< 0,10	< 0,10
Cu	< 0,05	< 0,20	< 0,15	< 0,10

4. Влияние марки стали и временного сопротивления проволоки диаметром 1,80 мм на отношение P_b^- / P_b^+

Марка стали	$\sigma_в$, МПа			Среднее значение по строкам
	1570	1770	2060	
65 КК	1,04	1,05	1,03	1,04
65Г	1,05	1,05	1,04	1,05
70	1,05	1,06	1,05	1,05

В табл. 3 приведен фактический химический состав сталей, применяемых для изготовления проволоки, а в табл. 4 – средние значения отношения максимальной нагрузки растяжения при отрицательной и положительной температуре P_b^- / P_b^+ для проволоки диаметром 1,80 мм различной группы прочности. Средние значения получены по результатам трехкратных испытаний образцов.

Дисперсионный анализ результатов табл. 4 показывает, что марка стали и временное сопротивление проволоки не влияют на отношение P_b^- / P_b^+.

В табл. 5 приведены результаты испытания проволочных образцов на кручение и значения отношения средних величин при положительной и отрицательной температурах $\bar{n}_{скр}^+ / \bar{n}_{скр}^-$.

5. Число скручиваний до разрушения образцов проволоки диаметром 1,80 мм при +20 и –55 °С

Марка стали	Q, %	$n_{скр}^+$	$n^-_{скр}$	$\bar{n}_{скр}^+ / \bar{n}_{скр}^-$
65 КК	70,2	54; 47; 74; 75; 52; 60	7; 10; 7; 14; 9; 9	6,5
	81,6	46; 48; 60; 44; 65; 74	8; 8; 11; 13; 8; 8	6,0
	90,4	49; 36; 49; 49; 47; 52	39; 41; 43; 39; 42	1,2
65Г	70,2	45; 81; 44; 74; 44; 52	7; 4; 7; 5; 6; 7	9,4
	81,6	46; 48; 60; 44; 65; 74	8; 8; 11; 13; 8; 8	4,7
	90,4	49; 36; 49; 49; 47; 52	39; 41; 43; 39; 42	1,2
70	61,5	45; 43; 45; 81; 77; 80	7; 8; 8; 8; 7; 7	8,2
	77,6	60; 55; 59; 76; 63; 54	16; 17; 24; 17; 21	3,5
	87,0	50; 66; 71; 51; 48; 60	46; 40; 37; 30; 34	1,5

Обозначение. Q – технологическая вытяжка.

Выводы

При уменьшении температуры испытания от +20 до –55 °С установлено незначительное уменьшение пластичности при растяжении, характеризуемой степенью деформации металла в месте разрушения. При этом наблюдали увеличение прочности на 3...6 % и значительное снижение числа скручиваний проволоки до разрушения при отрицательной температуре.

Пластическая деформация патентированной заготовки из сталей 65 КК, 65Г и 70 снизила влияние отрицательной температуры на прочностные и пластические свойства при растяжении и число скручиваний до разрушения проволоки.

Уровень качества опытной проволоки из стали 70 и импортного аналога по механическим свойствам при растяжении, скручивании и знакопеременном перегибе одинаковый.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1986. 688 с.

Геннадий Николаевич Гурьянов, канд. техн. наук;
Борис Андреевич Коломиец, канд. техн. наук;
Геннадий Васильевич Баталов, канд. техн. наук;
Владимир Яковлевич Киселёв, ст. науч. сотрудник

В.И. Семёнов *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Закономерности сегрегационных атомных перегруппировок при кристаллизации эвтектик

Рассмотрены причины и механизм перегруппировки атомов при кристаллизации эвтектик.

The reasons and the mechanism of atoms regrouping at eutectics crystallization are considered.

Ключевые слова: кристаллизация; эвтектика; перегруппировка атомов; свободная энергия; энергетический барьер; фазовое превращение; сегрегация.

Key words: crystallization; eutectic; atoms regrouping; free energy; power barrier; phase trasformation; segregation.

Современные сплавы, как правило, многофазны и содержат эвтектику. Кристаллизация связана с отводом тепла. Первым кристаллизуется избыток растворенных тугоплавких компонентов. Он выпадает из расплава в виде кристаллов твердого раствора. Происходит естественное изменение состава расплава. Остаток эвтектического состава кристаллизуется при эвтектической температуре. Рассмотрение механизма сегрегационных перегруппировок является принципиальным моментом при изменении фазового состояния эвтектики.

Будем иметь в виду, что между компонентами расплава устанавливается такое взаимодействие, при котором линии ликвидуса на диаграмме состояния сходятся в области эвтектики и определяют сбалансированный состав сплава. Проявляемые свойства эвтектического сплава дают право считать, что между его атомами (точнее, ионами) устанавливается взаимодействие, при котором атомы получают внешние близкие к сферической форме электронные оболочки, самосогласованные путем минимизации скрытой недокомпенсированной внутриатомной энергии, соразмерные в смысле устойчивых взаимодействий и соблюдения отношений их радиусов настолько, что обеспечиваются условия плотной упаковки и одновременно свободного взаимного замещения друг друга в межатомных группах. Атомы сбалансированного состава сплава различные по строению проявляют сходные свойства.

Естественно, что к таким свойствам имеют отношение смешанные электронные оболочки атомов – электронный "газ". К нему переходит и он накапливает часть энергии свободных невозмущенных атомов. Свободная энергия электронного "газа" помогает атомам взаимодействовать с соседями, а электронам занимать самые низкие энергетические уровни.

В двухкомпонентном α-растворе свободная энергия на атом f^{α} равна

$$f^{\alpha} = xf_A^{\alpha} + (1-x)f_B^{\alpha} + \Delta f_{AB}^{\alpha}, \qquad (1)$$

где f_A^{α} и f_B^{α} – свободные энергии на атом компонентов A и B в α-растворе; x и $(1 - x)$ – соответственно их доли в α-растворе; Δf_{AB}^{α} – энергия смешения.

Свободная энергия Δf_{AB}^{α} непосредственно определяет энергетический уровень ассоциированного электронного взаимодействия, который допустимо рассматривать одновременно с уровнем искажения электронной конфигурации атомов. При этом существенно не только абсолютное значение энергии смешения, а также то, что она является отрицательной величиной. Вследствие этого в сплаве сбалансированного состава свободная энергия на атом f^{α} минимальна.

Эвтектика, которая еще при $T = T_м$ представляла собой однородный гомогенный раствор, имеет свойство расслаиваться на фронте кристаллизации в очень узком интервале первоначального переохлаждения $\Delta T = T - T_м$ даже при высоких скоростях охлаждения ($1 \cdot 10^4$ К/с и выше). Затвердевшая эвтектика становится гетерогенной системой из кристаллов чистых компонентов или очень ограниченных взаимных растворов.

Как известно, причиной того, что металлы дают расслаивающиеся фазы, служит понижение взаимодействия атомов. Следовательно, ниже эвтектической температуры силовой баланс взаимодействия атомов оказывается энергетически невыгодным в метастабильной жидкой эвтектике. Он достиг критической величины и не может быть разрешен путем дальнейшего искажения электронных структур атомов.

Очевидно, что они исчерпали свои энергетические возможности.

Естественное предположение состоит в том, что при наступлении метастабильного состояния ($T < T_м$) спадание температуры сначало замедляет скорость сгущения энергии смешения, затем она сравнивается с нулем и меняет знак. Это подчеркивает непрерывный переход от усиления к ослаблению межатомных взаимодействий и наступление необратимых фазовых атомных перегруппировок.

Обоснованным с точки зрения минимизации свободной энергии системы становится возврат атомов к начальному значению ионного потенциала и невозмущенным электронным оболочкам путем образования новых межатомных конфигураций. Насколько оправданным представляется сделанное предположение можно проверить тем, что эвтектический сплав возвращается к фазам, состав которых близок исходным компонентам.

Сегрегация компонентов эвтектики наступает при спадании температуры и требует некоторого, хотя и небольшого, переохлаждения. Отношение первоначального переохлаждения к скорости охлаждения дает "окно" – время переходной стадии. По крайней мере, оно необходимо, чтобы атомы, связанные одной межатомной конфигурацией и общим пространством, получили соответствующие скорости и направления миграции. Количественным критерием атомной перегруппировки способен быть эффективный путь миграции атомов. Критерий имеет существенное значение в структурном аспекте проблемы. Подходя к границе и "предчувствуя" ее, атомы понижают диффузионную подвижность настолько, что миграция переходит в процесс накопления.

Совершенно закономерно, что критерий миграции является фрактальной величиной. Как известно, фракталами признаются части природной среды, которая при потере устойчивости делится так, что сохраняется общность и даже отдельные структуры. В рассматриваемом случае фракталам отвечают утратившие стабильность межатомные конфигурации эвтектики и локализовавшиеся в структурные единицы так, что процессы перегруппировки атомов развиваются подобным образом. Движущие силы свободной энергии создают минимальное количество фрактальных структур, максимальных по объему.

Из термодинамических соображений свободная энергия на атом $f_м^\alpha$ метастабильного металлического α-раствора определяется слагаемыми:

$$f_м^\alpha = (\Delta f_{AB}^\alpha)_{T_м} - \Delta S_м^\alpha \Delta T, \qquad (2)$$

где $(\Delta f_{AB}^\alpha)_{T_м}$ – энергия смешения на атом при $T = T_м$; $\Delta S_м^\alpha$ – прирост энтропии на атом метастабильного α-раствора; $\Delta T = T - T_м$ – переохлаждение.

Как известно из термодинамики, энтропия равна частной производной свободной энергии по температуре с обратным знаком ($S = -\partial F / \partial T$). Из атомарно-кинетических соображений следует, что прирост энтропии вызван падением взаимодействий атомов A и B в растворе. Прирост энтропии $\Delta S_м^\alpha$ является положительной величиной, поэтому переохлаждение увеличивает свободную энергию метастабильного раствора. Поскольку прирост $\Delta S_м^\alpha$ ограничен, а величина ΔT мала у эвтектик, то с достаточно хорошей точностью можно считать малым слагаемое $\Delta S_м^\alpha \Delta T$ по сравнению с $(\Delta f_{AB}^\alpha)_{T_м}$ в равенстве (2). Оба слагаемых этого равенства определяют положительный рост свободной энергии. Первоначальное переохлаждение ΔT активирует энергетический барьер, способный ограничить устойчивость энергии $f_м^\alpha$.

Неустойчивая свободная энергия $f_м^\alpha$ способна играть главную роль при фазовых перегруппировках в метастабильной жидкой фазе. Следовательно, энергию $f_м^\alpha$ можно считать фазовой энергией, так как именно атомные перегруппировки требуют основных трат энергии. Стоит также учитывать, что теплота перехода в металлах обычно составляет величину всего лишь порядка 1 % энергии связи в твердом теле, мерой которой служит теплота испарения. Это дает $\Delta H = N f_м^\alpha$, где N – число Авогадро. Теплоту перехода ΔH стоит рассматривать как оценку движущей силы фазовой атомной перегруппировки.

Структурный фрактальный параметр атомной перегруппировки R_m, первоначальное переохлаждение ΔT, коэффициент диффузии D и скорость охлаждения метастабильного расплава $v_{охл}$ связаны отношением [1]:

$$R_m = \sqrt{\frac{\Delta H D \Delta T}{RT}} v_{охл}^{-\frac{1}{2}}. \qquad (3)$$

Оно дает возможность видеть рычаги управления положением структурных границ фазовой перегруппировки атомов. Одним из них является величина первоначального переохлаждения ΔT. При достаточно малой величине ΔT у эвтектик время переходного периода мало ($\tau_м = \Delta T / v_{охл}$), по истечении которого активируется энергетический барьер. Последний модифицирует электронные оболочки атомов так, что изменяет растворимость компонентов метастабильной фазы по отношению к стабильной фазе того же состава.

Отметим, что в классической теории образование кристаллических структур объясняют через скорости зарождения и роста, но требуется иметь оценки этих величин. Теория связывает обе эти оценки непосредственно с отношением $\Delta T / T_м$. В действительности же не удается дать общую оценку значения $\Delta T / T_м$, при котором скорость зарождения становится заметной. Отсюда возникает трудность конкретизации начального состояния зарождения и создается неопре-

деленность перехода к взаимному прорастанию фаз при кристаллизации эвтектик в том числе.

Фазовая энергия ΔH диффузионного переноса в тепло не превращается, а сохраняется при атомах как энергия активации A. Возврат атомам этой энергии ведет к нарастанию плотности избыточной свободной энергии в переходных слоях структурных границ первичной фрактальной перегруппировки атомов. Градиент плотности некомпенсированной поверхностной энергии определяет нецентральные силы обменного атомного взаимодействия. Они самопроизвольно из условия минимума трат свободной энергии так организуют взаимные перегруппировки, что в переходных слоях структурных границ на несколько порядков растет коэффициент поверхностной диффузии. В литературе имеются расхождения на порядок и более относительно численного значения этого коэффициента.

Избыточная поверхностная энергия начинает новую структурную перегруппировку, цель которой – минимизация свободной энергии путем слияния (коагуляции) переходных слоев дисперсной системы. Из условия многократного роста коэффициента поверхностной диффузии D_n заметно увеличивается структурный фактор $R_{m,n}$ этой перегруппировки. Из равенства (3) следует:

$$R_{m,n} / R_m = \sqrt{D_n / D}. \quad (4)$$

В случае роста значения D_n на четыре порядка по сравнению с D величина $R_{m,n}$ по сравнению с R_m увеличивается в 100 раз. Это может служить убедительным фактором, который указывает на возможность образования в метастабильной жидкой эвтектике новых кустовых структур на базе первичных дисперсных структур, которые становятся интегрированы в колонии общим коагуляционным механизмом.

Для наблюдения за кристаллизацией широко применяется закалка, в действительности же обычно используются высокие скорости охлаждения. Примером может служить рис. 1, *а*, где расплав эвтектики Al – $CuAl_2$ охлаждался с высокой скоростью. Структуры этого типа названы сферолитными колониями эвтектики.

Известно стремление капель жидкости принять равновесную форму шара в отсутствие внешних сил, когда их плотность равна плотности окружающей среды. Нечто подробное происходит с кустовыми структурами, возникшими в метастабильной эвтектике в переходный период. Условие разделения (сегрегации) компонентов [1]:

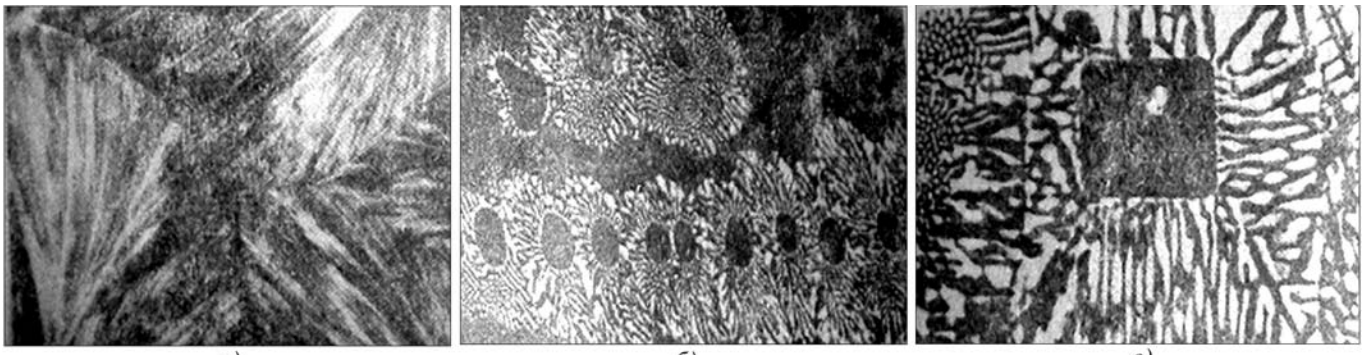
$$\ln K_р = \Delta H / RT, \quad (5)$$

где $K_р$ – коэффициент распределения, требует соблюдения постоянной плотности избыточной свободной энергии переходных слоев фазовой границы, а сама сегрегация самопроизвольно решается за счет фазовой энергии ΔH. Следовательно, коагуляция может только уменьшать площадь фазовой поверхности, которая в этот момент еще не связана условием гетерогенности.

Если равенство (4) устанавливает фрактальный размер кустовых структур, то равенство (5) налагает условие, что их форма должна приближаться к сферической. Равновесная форма шара ближе всего удовлетворяет условию минимума замкнутой поверхности при данном объеме. Ее энергетический потенциал одновременно служит барьером, который не позволяет собирательным процессам соседних кустовых структур взаимодействовать, что также следует из рис. 1, *а*.

Условие (5) разделения компонентов действует в течение всего фазового периода по всем субграницам и фазовым границам и определяет возможность достижения предельной растворимости. Первые выделения новых фаз принимают вид множества капель. Они сливаются, а сам собирательный процесс ускоряется интенсивным образованием новых. Первичная фрактальная структура налагает условие, что слившиеся капли должны располагаться чередующимися слоями и разделяться эвтектическим раствором.

Метастабильное состояние возбуждает базисный мотив, ведущий к образованию локальных групп атомов с кристаллической упаковкой. Атомы, восприни-



а) *б)* *в)*

Рис. 1. Строение эвтектических колоний (Al – $CuAl_2$) [2]:
а – сферолитные. × 300; *б* – дендритные. × 200; *в* – полиэдрические. × 100

мающие базисный мотив, изменением внутреннего строения превращают избыточную фазовую энергию в тепловую и фиксируют кристаллическую решетку. Утвердившийся первым базисный мотив получает предпочтение для трансляции вдоль субграниц и становится основным для фазовых границ. Очевидно, что вследствие труднoподвижности атомы гетерогенной фазовой поверхности, связывая соседние атомы жидкой фазы условием базисного мотива, будут препятствовать слиянию жидких прослоек.

Рассмотрение строения сферолитных колоний на рис. 1, *а* показывает, что внутренним собирательным процессам наиболее полно отвечает радиальная структура. Ее сущность связана с минимизацией путей диффузионного переноса, т.е. для сбора избыточной жидкой фазы поверхностные силы свободной энергии переходных слоев своим прямым действием на гетерогенную фазовую поверхность дают ей возможность преимущественно развиваться в радиальной форме.

Свободные энергии f_A^α и f_B^α на атом фаз компонентов A и B двух фаз не равны. Это объясняет, что уже на ранней стадии развития кустовых структур в занимаемом ими пространстве создаются соответствующие несогласованные вариации средней плотности свободной энергии. Коагуляционный процесс будет интенсивнее собирать ту жидкую фазу, избыточное количество которой нарушает равновесие плотности свободной энергии. С этим связано закономерное появление центрального элемента – корня кустовой структуры (рис. 1, *б*). Его расположение указывает на равнодоступную кинетику слияния, а сферическая форма определена условием минимума замкнутой поверхности.

По мере прироста объема корня уменьшается кривизна поверхности и соответственно падает избыток давления на искривленной поверхности. При достаточно большом радиусе кривизны поверхности роль этого давления полностью нивелируется в сравнении с поверхностным натяжением плоских граней.

Различные грани кристалла отличаются величиной поверхностного натяжения – избыточной свободной энергией переходных слоев. При условии, что поверхностное натяжение не изменяется при росте кристалла, то преимущество в скорости роста имеют те его грани, у которых поверхностное натяжение ниже. Поэтому в процессе собирательной кристаллизации избыточной фазы сферическая форма корня переходит в полиэдрическую.

Собирательная кристаллизация охватывает всю кустовую структуру и в том числе стремится устранить беспорядок ступеней плоских граней. Когда равновесный беспорядок ступеней становится мал, то структурный мотив развитой центральной части колонии взаимодействием через ближайшие структуры последовательно выравнивает перегруппировкой упаковки атомов, понижая избыточную свободную энергию в целом до того минимума, что равновесная центральная форма корня повторяется во внешней форме куста (рис. 1, *в*).

Эвтектическая температура является особой точкой. При эвтектической температуре разность плотностей свободной энергии переходных слоев структурных групп атомов начинает нивелироваться и переходные слои размываются. Однако если скорость охлаждения увеличивать, то возрастающее переохлаждение ΔT дает прирост свободной энергии $\Delta f_{\text{м}}^\alpha$ согласно равенства (2). Этого прироста ($\Delta f_{\text{м}}^\alpha = -\Delta S_{\text{м}}^\alpha \Delta T$) оказывается достаточно, чтобы фрактальные структуры метастабильной эвтектики сохраняли устойчивость, уменьшая фрактальный размер сегрегационной перегруппировки.

Когда возможный размер R_m перегруппировки становится соизмерим с размером фрактальных структур метастабильной эвтектики, то перегруппировки атомов на базе нового фрактального размера теряют термодинамический смысл. Это означает, что для таких скоростей охлаждения можно получить предельно измельченные кристаллические структуры на базе фрактальных структур самого метастабильного расплава. У эвтектик они получили название тонкого конгломерата фаз (вырожденная эвтектика). Сплавы различных систем способны к таким предельным переходам (рис. 2). Эта закономерность может быть от-

а) *б)* *в)*

Рис. 2. Структура тонкого конгломерата фаз (вырожденная эвтектика) [2]:
а – Sb–$CuSb_2$. × 1500; *б* – Ag–Cu. × 10 000; *в* – Fe–C. × 6000

несена также к недендритным зернам. Повышение скорости охлаждения облегчает получение тонкого конгломерата фаз и недендритной литой структуры.

Заключение

1. Взаимодействие внешних валентных орбиталей атомов металлического раствора сопровождается накоплением свободной энергии. В результате атомные структуры повышают упорядоченность. Упорядоченность межатомных взаимодействий растет при спадании температуры и с увеличением скорости охлаждения.

Литейная практика подтверждает, что быстрая кристаллизация позволяет получать твердые растворы и эвтектики при существенно более высоких концентрациях компонентов в сравнении с равновесными их значениями и расширяет возможности легирования сплавов.

Одновременно охлаждение нарушает равновесие упорядоченных атомных структур тем, что усиливает искажение внешних валентных орбиталей. Атомы ставят искажению своих орбиталей энергетический барьер. Он, достигнув соответствующего уровня, становится причиной атомной сегрегационной перегруппировки, а ее движущей силой – накопленная избыточная свободная энергия.

2. Существует реальная физическая связь между перегруппировками атомов и превращениями внутри исходной фазы. Перегруппировки зависят от времени переходного периода и фрактального параметра. В переходный период проявляет себя эффект нестационарности – первоначальное переохлаждение, которое выполняет роль активации энергетического барьера. В конденсированных металлических системах активация энергетического барьера изменяет растворимость компонентов по отношению к стабильной фазе того же состава. Параллельно в переходный период устанавливается фрактальный параметр.

В нормальных условиях переохлаждения с установлением фрактального параметра гомогенный метастабильный раствор становится структурированным. Эта первичная структура устанавливает границы, по которым сегрегационным выделением через пересыщение ассоциированных групп атомов начинается зарождение. Оно продолжается, пока не установится квазистационарное состояние фазовой поверхности.

Последующее присоединение атомов сегрегационным выделением через пересыщение, если оно составляет заметную величину, приводит к росту новых фаз при одновременном процессе распада исходного раствора. Работа движущих сил является скрытой и сохраняется при атомах как энергия активации. Это означает, что пограничные слои наделяются избыточной свободной энергией и все последующие превращения протекают при минимизации поверхностной энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Семёнов В.И.** Измельчение кристаллизационной структуры сплавов путем управления межатомным взаимодействием // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 11. С. 10 – 15.

2. **Мирошниченко И.С**. Закалка из жидкого состояния. М.: Металлургия, 1982. С. 44 – 56.

Вячеслав Иванович Семёнов, канд. техн. наук

Волчкевич Л.И. **Автоматизация производственных процессов**: учеб. пособие. 2-е изд., 2007. – 380 с., тв. пер., 60×88 1/16

ISBN 978-5-217-03387-4

Цена с НДС 308 руб.

Пособие призвано дать будущим инженерам-машиностроителям комплекс знаний и умений по трем квалификационным уровням: 1)общей эрудиции, знанию материальной части; 2) вариантности технических решений, их сравнительному анализу и оценке; 3) синтезу технических решений, расчету и проектированию. Особое внимание обращено на выбор оптимальных структурно-компоновочных решений при проектировании машин-автоматов и их систем на этапе технического предложения.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению 651600 "Технологические машины и оборудование" специальности 120900 "Проектирование технических и технологических комплексов", может быть полезна инженерно-техническим работникам промышленных предприятий.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел подписки, маркетинга и рекламы по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение". Справки по тел. (499) 269-66-00.
http://www.mashin.ru

Казанцев А.Г., Феклистов С.И., Шуваев В.А., Войдер К.А.
(ОАО НПО "ЦНИИТМАШ", Москва)

Определение механических свойств металла труб по данным испытаний на растяжение тангенциальных образцов с начальной кривизной

С использованием метода конечных элементов выполнено моделирование напряженного состояния тангенциальных образцов с начальной кривизной, используемых при испытании металла труб по стандартам API Spec 5L, ASTM A370. Показано, что величина условного предела текучести, определяемая по данным таких испытаний, зависит от радиуса трубы, из которой вырезан образец, а также от наличия остаточных напряжений, возникающих при изготовлении трубы. Погрешность оценки предела текучести увеличивается с уменьшением радиуса трубы, зависит от зоны вырезки образца (по толщине стенки) и составляет до 25 % при радиусе трубы 250 мм.

Stress in tangential curved pipe specimen, testing on API Spec 5L, ASTM A370 under tension was modelled by finite element method. It was shown, that yield stress, determined in this test, depends of pipe size and residual stress. Deviation of yield stress increase with decreasing pipe size, depends of cutting zone in thickness and can be up 25 % for 250 mm radius pipe.

Ключевые слова: метод конечных элементов; тангенциальный образец с начальной кривизной; диаграмма деформирования; труба; предел текучести; остаточные напряжения.

Key words: finite element method; tangential curved specimen; stress-strain curve; pipe; yield stress; residual stress.

При проведении аттестационных испытаний труб одной из контролируемых характеристик механических свойств металла является величина условного предела текучести при растяжении $\sigma_{0,2}$, определяемая на полнотолщинных образцах, вырезанных из трубы в тангенциальном направлении (стандарты API 5L, A370). Конструкция такого образца аналогична плоскому, однако широкая сторона имеет кривизну, соответствующую кривизне трубы, а толщина равна толщине стенки трубы. Образец схематично показан на рис. 1. Перед испытанием возможна правка образца для придания ему более плоской формы.

Поскольку при испытании таких образцов помимо растяжения происходит их изгиб, предел текучести материала, рассчитываемый по диаграммам нагрузка – перемещение (или деформация на установленной базе измерения), определяется с некоторой погрешностью. Величина этой погрешности зависит от кривизны образца, его прогиба при правке перед испытаниями (если она выполняется), последовательности закрепления в захватах испытательной машины, а также базы измерения деформаций.

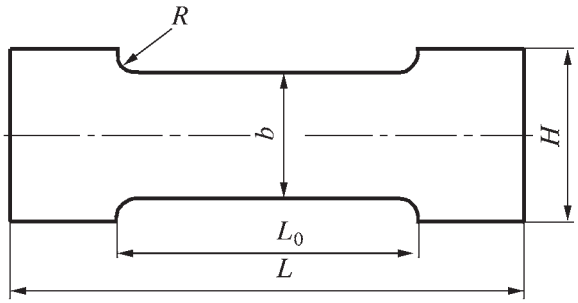


Рис. 1. Образец для испытаний на растяжение

Так как в действующих стандартах на проведения подобных испытаний данные моменты не нашли достаточного отражения, а определяемая характеристика $\sigma_{0,2}$ является сдаточной, на принимаемое решение об отбраковке или о пригодности трубы оказывает влияние сама процедура подготовки образцов и порядок проведения испытаний.

В настоящей работе выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния в образцах с начальной кривизной при варьировании указанных выше факторов. Рассмотрено также влияние на предел текучести остаточных технологических напряжений и предварительной деформации, возникающих при изготовлении трубы из листа. Конечно-элементные модели плоского образца и образца с начальной кривизной приведены на рис. 2.

Расчеты выполнялись с учетом геометрической нелинейности и работы материала за пределами упругости. При исследовании влияния кривизны образца предполагалось, что остаточные напряжения в трубах отсутствуют, а материал является однородным. Исходные диаграммы деформирования металла трубы, используемые при расчете, задавались в пластической области с линейным упрочнением при отсутствии и при наличии площадки текучести (рис. 3). Предел текучести принят равным 400 МПа, модуль упругости –

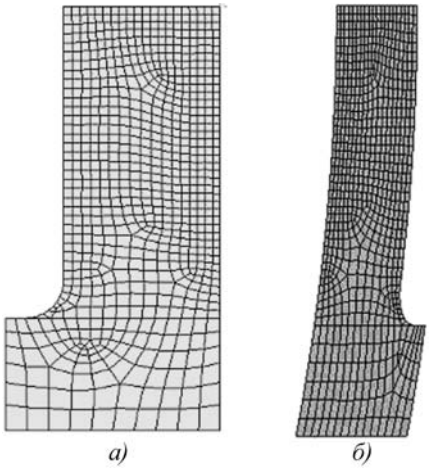


Рис. 2. Конечно-элементные модели прямого плоского образца (*а*) и образца с начальной кривизной (*б*)

$2 \cdot 10^5$ МПа, модуль упрочнения – $G_т$ = 1000 МПа (на диаграмме без площадки текучести) и 6000 МПа (на диаграмме с площадкой текучести). Протяженность площадки текучести составляла в относительных деформациях 0,2 %.

При расчете были приняты следующие размеры образца (см. рис. 1): L = 140 мм, L_0 = 80 мм, H = 60 мм, b = 38 мм, R = 5 мм. Радиус кривизны образца ρ варьировался и составлял 1000, 500, 375 и 250 мм. Толщину стенки принимали постоянной и во всех случаях равной 12 мм. Для сопоставления выполнен также расчет плоского образца (ρ = ∞) с аналогичными размерами. Во всех случаях расчет с учетом симметрии проводили для 1/4 части образца.

Напряжения и деформации при построении расчетных диаграмм деформирования определяли без учета изгиба образца в процессе испытания. Полученные таким образом диаграммы деформирования для различных баз измерения деформаций (10 и 80 мм) (рис. 4–7) и рассчитанные значения пределов текучести были сопоставлены с исходными, заданными при

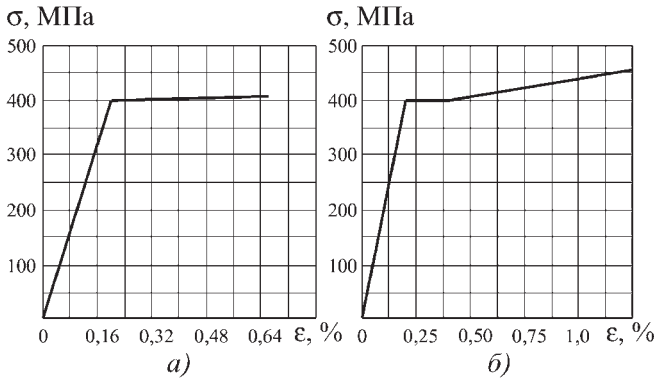


Рис. 3. Исходная диаграмма деформирования без площадки текучести (*а*); с площадкой текучести (*б*)

расчете. Принято, что измерение деформаций на базе 10 мм проводилось в центральной по длине части образца, база 80 мм соответствует перемещению головок образца.

Из рис. 4–7 видно, что с увеличением кривизны образца расхождение между фактическими свойствами материала (используемыми в расчете в качестве исходных данных) и полученными расчетными диаграммами деформирования увеличивается, причем эти изменения зависят от базы измерения деформаций. Для базы 10 мм в зоне перехода к пластическим деформациям отмечается отклонение диаграммы деформирования в сторону, обратную направлению нагружения.

Диаграммы, полученные для базы 80 мм, являются более пологими и показывают более низкие значения

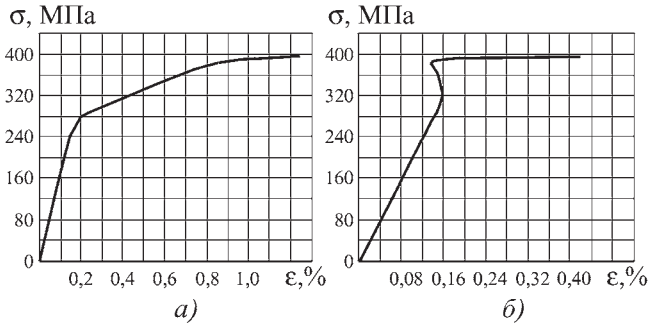


Рис. 4. Кривые деформирования образца, вырезанного из трубы радиусом ρ = 250 мм при базе измерения деформаций 80 мм (*а*) и 10 мм (*б*)

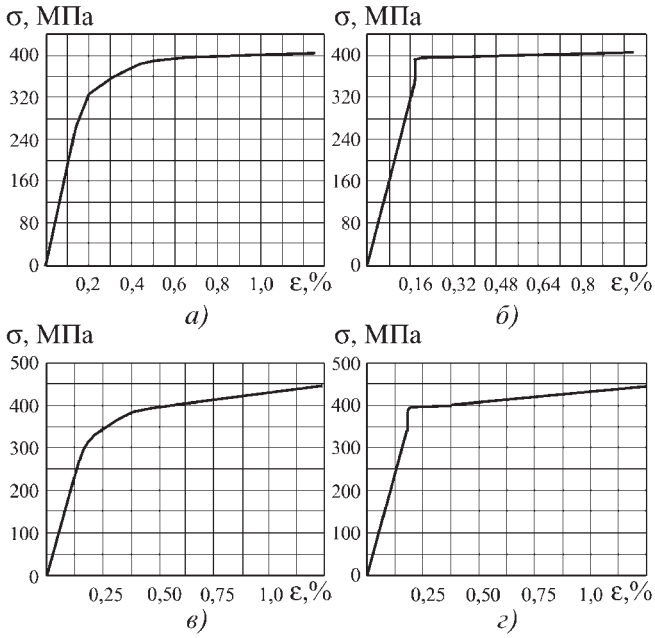


Рис. 5. Кривые деформирования образца, вырезанного из трубы радиусом ρ = 375 мм для материала без площадки текучести (*а, б*) и с площадкой текучести (*в, г*) при базе измерения деформаций 80 мм (*а, в*) и 10 мм (*б, г*)

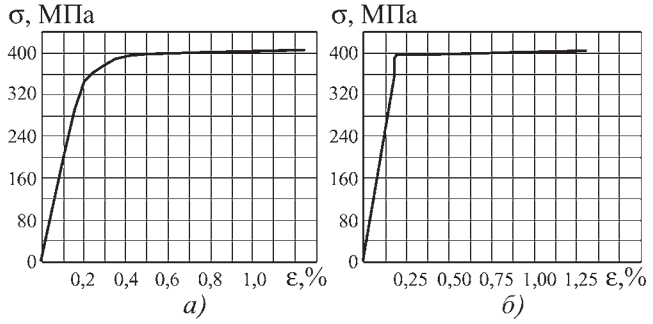


Рис. 6. Кривые деформирования образца, вырезанного из трубы радиусом ρ = 500 мм при базе измерения деформаций 80 мм (*а*) и 10 мм (*б*)

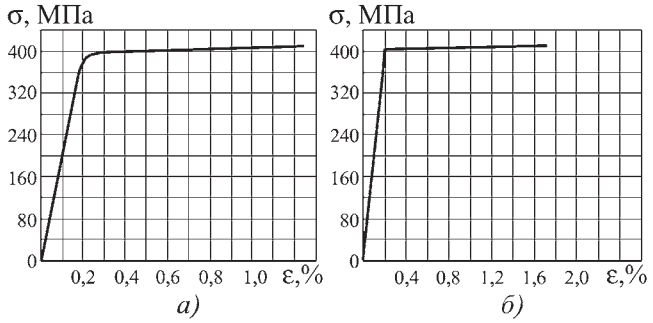


Рис. 7. Кривые деформирования образца, вырезанного из трубы радиусом ρ = 1000 мм при базе измерения деформаций 80 мм (*а*) и 10 мм (*б*)

предела текучести, что, видимо, обусловлено некоторым увеличением длины образца при его распрямлении в процессе нагружения. Соответствующие расчетные значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ приведены в таблице. Было также получено, что при испытании образцов с кривизной (ρ = 375 мм) не выявляется площадка текучести, которая присутствует на исходной диаграмме деформирования материала (см. рис. 5, *в*, *г*). При уменьшении кривизны (ρ > 500 мм) данные эффекты заметно снижаются.

Таким образом, более точные оценки предела текучести обеспечиваются при малых базах измерения деформаций. При оценке $\sigma_{0,2}$ по диаграммам нагрузка – перемещение захватов или использовании экстензометров с большой базой погрешность при радиусе трубы ρ = 250 мм может составлять до 20 %.

В работе было также исследовано влияние предварительной деформации и остаточных напряжений,

Влияние кривизны образца (радиуса трубы) на предел текучести

Радиус трубы ρ, мм	∞	1000	500	375	250
$\sigma_{0,2}$, МПа, на базе:					
10 мм	400	400	400	400	396
80 мм	400	400	395	380	315

возникающих при изготовлении трубы (при гибке) на вид диаграмм деформирования и предел текучести при испытании тангенциальных образцов. Рассматривали трубу радиусом 500 мм с толщиной стенки 12 мм. Как показано выше, при данных размерах эффект собственно кривизны несущественен.

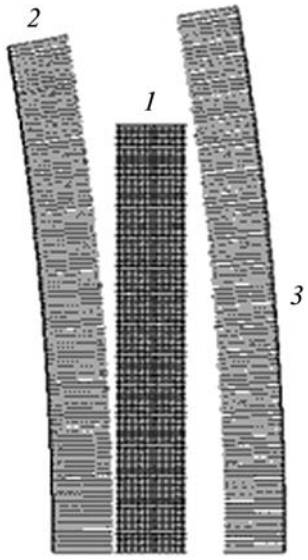


Рис. 8. Конечно-элементная модель:
1 – листа; *2* – неподвижной опоры; *3* – пуансона; 1/2 часть

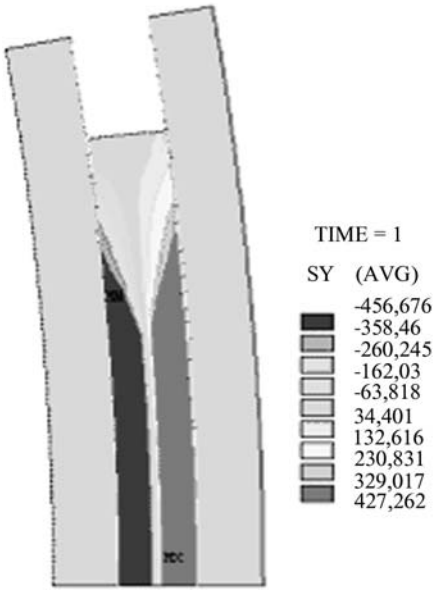
Расчет проводился с использованием конечно-элементной модели, приведенной на рис. 8. Для моделирования остаточных напряжений решалась упрощенная контактная задача о гибке листа *1* вокруг неподвижной матрицы *2* с выпуклой цилиндрической поверхностью радиусом 488 мм с помощью пуансона *3* с вогнутой цилиндрической поверхностью радиусом 500 мм.

Рассматривался сегмент трубы с длиной по окружности около 140 мм, что приблизительно совпадает с длиной образца для испытаний на растяжение по рис. 1, включая головки. Взаимодействие листа, матрицы и пуансона учитывалось контактными элементами. В силу симметрии расчет выполнялся для 1/2 части модели в соответствии с приведенной на рис. 8 схемой. Предполагалось, что в трубе возникает плоское деформированное состояние. Пластические свойства материала описывались теорией течения с анизотропным упрочнением, что позволяет учесть проявление эффекта Баушингера при изменении направления деформирования. Статическая диаграмма деформирования была принята по рис. 3, *а*.

На рис. 9 показано, что в конце рабочего хода пуансона в центральной части сегмента возникает достаточно равномерное напряженное состояние. Напряжения на наружной и внутренней поверхностях трубы превышают предел текучести (400 МПа), пластическая деформация достигает 1,4 %. Характер распределения напряжений по толщине листа показан на рис. 10. При разгрузке (возврате пуансона) возникают остаточные напряжения, распределение которых приведено на рис. 11 и 12.

Напряжения в сегменте в конце рабочего хода пуансона приблизительно соответствуют остаточным напряжениям в трубе после заварки продольного шва (на удалении от него), а остаточные напряжения после возврата пуансона в исходное состояние – остаточным напряжениям в тангенциальном образце по-

Рис. 9. Распределение тангенциальных напряжений в листе в конце активного хода при гибке



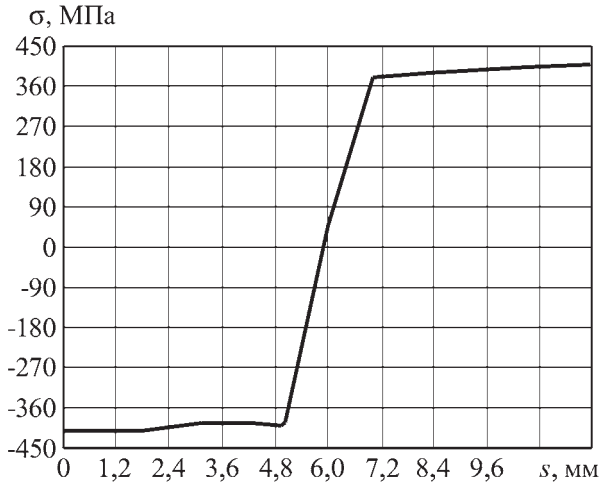


Рис. 10. Распределение активных тангенциальных напряжений по толщине листа при гибке в конце рабочего хода (центральная часть модели)

сле его вырезки из трубы. Их максимальная величина достигает приблизительно 80 % от предела текучести.

В момент возврата пуансона в исходное положение к образцу прикладывалась осевая нагрузка и он подвергался растяжению.

На рис. 13 показано изменение напряжений на внутренней и наружной поверхностях трубы (образца) в процессе гибки и последующего растяжения. Характерным является то, что распределение напряжений в процессе гибки, а также остаточных напряжений по сечению существенно неравномерное, однако при растяжении образца с переходом в область пластических деформаций происходит практически их полное выравнивание (при $t \approx 2{,}9$). При этом на сжатой стороне образца (внутренняя поверхность трубы) наблюдается знакопеременное сжатие-растяжение, а на

Рис. 11. Распределение остаточных напряжений в листе после гибки

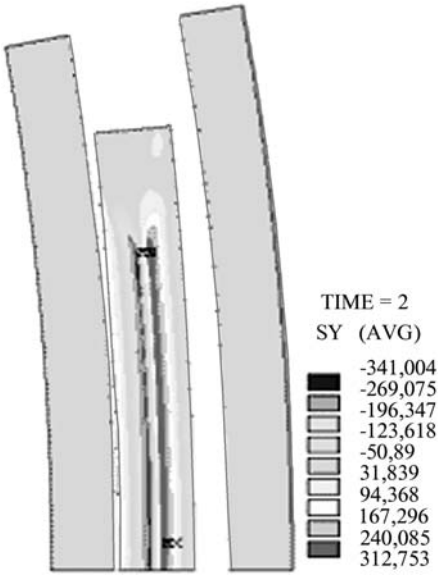


Рис. 12. Распределение тангенциальных остаточных напряжений по толщине листа после гибки (центральная часть модели)

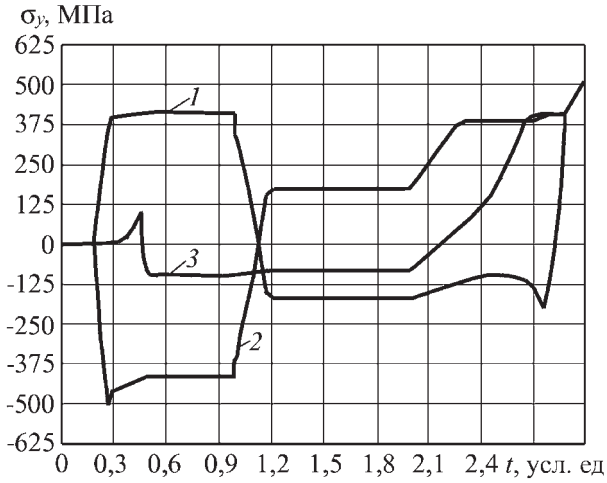


Рис. 13. Изменение тангенциальных напряжений на наружной (*1*), внутренней (*2*) поверхностях листа, а также в центральной части (*3*) в процессе гибки и испытания на растяжение образца; t = 0...1,0 – рабочий ход; t = 1,0...2,0 – возврат пуансона; t = 2,0...3,0 – растяжение образца

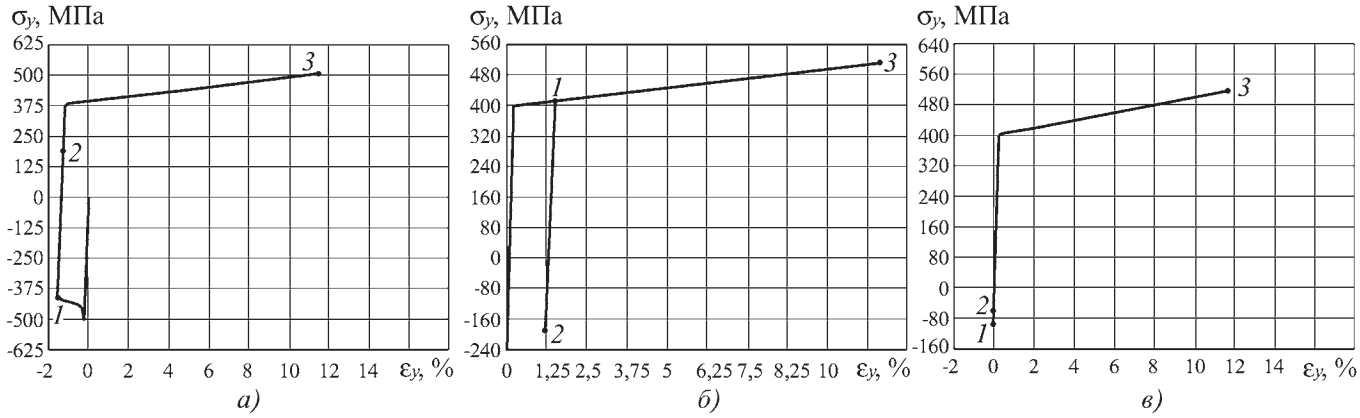


Рис. 14. Кривые деформирования для точек на внутренней (сжатой) поверхности трубы (*а*), на наружной (растянутой) поверхности трубы (*б*) и на нейтральной линии (*в*). Номера точек на кривых соответствуют принятой последовательности нагружения:
1 – рабочий ход пуансона; *2* – возврат пуансона; *3* – растяжение

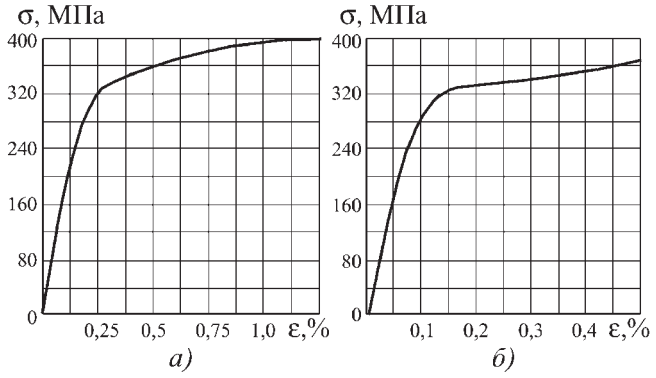


Рис. 15. Диаграмма деформирования образца с начальной кривизной с учетом остаточных технологических напряжений:
а – на базе 80 мм, $\sigma_{0,2}$ = 330 МПа; *б* – на базе 10 мм, $\sigma_{0,2}$ = 345 МПа

растянутой (наружная поверхность трубы) – растяжение с промежуточной разгрузкой (рис. 14).

Рассчитанные диаграммы деформирования образца при базе измерения деформаций (перемещений) 80 и 10 мм приведены на рис. 15, *а, б* . Сопоставление рис. 15, *а, б* и рис. 6, *а, б*, на котором для аналогичного типа трубы приведены расчетные диаграммы растяжения, полученные с учетом только кривизны образца, показывает, что остаточные напряжения, так же как и кривизна, приводят к заниженной оценке величины предела текучести материала.

Как следует из рис. 15, на базе измерения деформаций 80 мм величина $\sigma_{0,2}$ составляет порядка 330 МПа, на базе 10 мм – 345 МПа, что существенно ниже соответствующих значений для исходного листа ($\sigma_{0,2}$ = 400 МПа).

Необходимо отметить, что значения предела текучести образцов, вырезанных из различных зон сечения трубы, в которой имеются остаточные напряжения, будут отличаться. Например, для стандартного прямолинейного образца, вырезанного в тангенциальном направлении из центральной части сечения, в которой не возникали пластические деформации, предел текучести будет аналогичен полученному для исходного листа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **ASTM A370.** Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2003. 49 p.

Александр Георгиевич Казанцев, д-р техн. наук;
Станислав Ильич Феклистов, д-р техн. наук;
Валерий Александрович Шуваев, канд. техн. наук;
Кирилл Александрович Войдер, аспирант

В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, А.Е. Шестовских, Б.А. Кандалинцев
(Российская электротехнологическая компания – РЭЛТЕК, г. Екатеринбург)

Линия ультразвуковой очистки для подготовки поверхности длинномерных проводов и лент в заготовительных производствах

Рассмотрены результаты разработки и внедрения установки ультразвуковой очистки поверхности проводов и лент при подготовке их к технологическим операциям изготовления изделий. Опыт эксплуатации установки показал высокую эффективность и производительность процесса очистки под интенсивным воздействием кавитации в потоке моющей жидкости с последующей промывкой водой и сушкой поверхности. Установка отвечает высоким экологическим требованиям.

Subject of the article is the results in project engineering and production start-up works of ultrasonic cleaning system that designs for ultrasonic cleaning of long-length wire and belts. The plant operating experience demonstrated high efficiency and cleaning rate under the intensive cavitation treatment in washing fluid flow. The final stage is water washing, then hot air drying, and spooling. The system meets high environmental requirements.

Ключевые слова: РЭЛТЕК; ультразвуковая очистка; кавитация; очистка провода.

Key words: RELTEC; ultrasonic cleaning; cavitation; wire cleaning.

В заготовительных производствах машиностроительных предприятий часто требуется очищать поверхности материалов, изделий, отливок от консервантов, загрязнений, ржавчины и др. Для очистки длинномерных проводов предприятием "РЭЛТЕК" разработана линия ультразвуковой очистки УЗОП-3-18.

Среди процессов, протекающих под действием ультразвука в жидкости, очистка изделий от различных загрязнений получила наибольшее применение в промышленности. Высокое качество очистки, замена ручного труда, исключение пожароопасных токсичных растворителей являются главными преимуществами ультразвуковой очистки перед всеми известными методами удаления загрязнений.

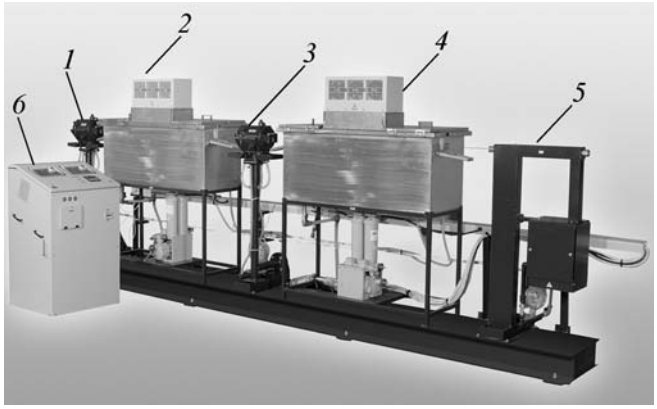
Разработанная линия очистки позволяет удалять с поверхности провода не только слабо связанные с очищаемой поверхностью загрязнения, но и кавитационно-стойкие, прочно связанные с очищаемой поверхностью жировые и окисные пленки, окалину и продукты коррозии.

При перемотке провода с катушки на катушку, он проходит через технологическую зону очистки, промывки и сушки.

Линия очистки (рисунок) состоит из следующих функциональных узлов и модулей. Установка для перемотки длинномерного провода содержит приемное и отдающее устройства, на выходных валах которых закреплены катушки. Максимальная масса катушки с проводом 300 кг. Приемное устройство снабжено автономным приводным механизмом раскладки провода с автоматическим реверсом направления движения. Диапазон плавного регулирования линейной скорости протяжки провода 2...10 м/мин. Предусмотрена стабилизация линейной скорости при постоянной силе натяжения провода.

Модуль предварительной очистки *1* предназначен для очистки провода от загрязнений, слабо связанных с очищаемой поверхностью: пыль, технологическая грязь, жировые капли и рыхлые травильные шламы. В модуле предварительной очистки провод подвергается струйной обработке горячей водой.

Модуль ультразвуковой очистки *2* предназначен для интенсивной очистки провода под действием кавитации. После предварительной очистки провод поступает в камеру модуля ультразвуковой очистки. Камера представляет собой секционированную трубку, каждая секция которой возбуждается отдельным пьезоэлектрическим преобразователем. В камеру под давлением поступает моющий раствор от фильтровальной установки. Высокое гидростатическое давление в камере повышает уровень кавитации и позволяет регулировать эрозионную активность кавитационной области.



Линия ультразвуковой очистки УЗОП-3-18

Принципиально в ультразвуковой камере, работающей под повышенным давлением, можно удалять любые загрязнения, кавитационная прочность которых ниже прочности материалов очищаемого изделия. Длина рабочей камеры определяет время воздействия ультразвука на очищаемую поверхность. В данной установке при линейной скорости провода 6 м/мин время очистки составляет около 5 с. Меняя количество секций в рабочей камере, можно получить требуемую производительность очистки.

Модуль удаления моющего раствора с поверхности провода *3* после ультразвуковой очистки идентичен по конструкции с модулем предварительной очистки. Здесь также используется струйная обработка провода горячей водой.

Модуль ультразвуковой промывки *4* предназначен для финишной очистки провода от моющего раствора перед сушкой, чтобы исключить оседание солей на поверхности провода. Модуль очистки и модуль промывки взаимозаменяемые.

Модуль сушки *5* содержит рабочую камеру, выполненную в виде трубы, в полости которой проходит очищенный провод. Встречно движению этого провода подается струя горячего воздуха. Температура воздуха плавно регулируется в заданном диапазоне.

Пульт дистанционного управления линией *6* предназначен для управления всеми агрегатами установки, обеспечения высокочастотным электропитанием ультразвуковых пьезокерамических преобразователей от встроенных ультразвуковых генераторов, а также для вывода на дисплей рабочих параметров установки и диагностических сообщений.

Данная линия внедрена в ОАО "ТВЭЛ" (г. Екатеринбург) для ультразвуковой очистки проводов из композиционного материала в оболочке из меди и медных сплавов от смазочных материалов, растительных жиров, окислов и грязи. Испытания показали хорошую работоспособность установки при различных линейных скоростях протяжки провода. Линейная скорость протяжки провода может варьироваться от 1,5 до 20 м/мин, причем скорость определяется требуемым временем очистки. Чем выше скорость, тем меньше время обработки. При очистке медная оболочка провода деформируется на толщину не более 2 мкм.

Конфигурация линии очистки позволяет применять ее для очистки любых металлических длинномерных проводов диаметром до 5 мм и лент шириной до 20 мм, толщиной до 1,5 мм.

Владислав Игоревич Лузгин, канд. техн. наук;
Александр Юрьевич Петров, канд. техн. наук;
Александр Егорович Шестовских, начальник отдела ультразвуковых технологий НТЦ;
Борис Анатольевич Кандалинцев, начальник лаборатории контроля и испытаний

Н.С. Арсентьева, А.И. Снигирев, Л.М. Железняк, Л.Н. Марущак, Е.В. Кузьмина, О.Л. Глухова *(ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов", Уральский государственный технический университет – УПИ, г. Екатеринбург)*

Высококачественные изделия из бериллиевых бронз, выпускаемые ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов"

Рассмотрено одно из ключевых направлений использования прутков из бериллиевых бронз для электродов контактной сварки, где требуется сочетание электропроводности, прочности и низкой ползучести при сварочных температурах. Сделан акцент на перспективной тенденции разработки Cu-Be-сплавов с высокими электро- и теплопроводностью, твердостью и прочностью. Освоен выпуск прессованных и холоднотянутых прутков из следующих марок бронз: Бр2, БрКБ2,5–0,5 и БрБНТ1,7 (по российским стандартам); C17200 и C17500 (по ASTM); CW101C и CW104C (по ENBS).

The publication highlights one of the key directions of rods usage made from beryllium bronzes for contact welding electrodes where it is necessary to have the compatibility of electric conductivity, hardness and low creeping at welding temperatures. The accent is made on the perspective tendency of development Cu-Be alloys with high electric and heat conductivity, hardness and solidness. The production of extruded and drawn rods from CuBe2, Cu2,5Co0,5 and CuBeNi hard (Russian standard); C17200 and C17500 (ASTM); CW101C and CW104C (ENBS) is adopted.

Ключевые слова: марочный сортамент; бериллиевые бронзы; отечественные и зарубежные марки; прессованные и холоднотянутые прутки для электродов контактной сварки; высокий качественный уровень.

Key words: branded range of products; beryllium bronzes; native and foreign grades; extruded and drawn rods for contact welding electrodes; high quality level.

Значительную долю сортамента завода составляют изделия из более чем 40 марок бронз: конструкционных (оловянных, кремниевых, марганцевых, алюминиевых, сложного химсостава); электротехнических (кадмиевой, магниевой, хромовой, циркониевой, хромоциркониевой), причем для трех последних оптимальных свойств достигают термодеформационной обработкой (ТДО), включающей закалку, холодную деформацию и искусственное старение.

Важнейшие из бронз с особыми физико-механическими свойствами – бериллиевые благодаря уникальному сочетанию механических, физических, антикоррозионных и других ценных качеств. Посредством ТДО изделиям из этих

бронз придают высокие механические свойства – прочность (включая циклическую), твердость, износостойкость, упругость. Они имеют высокие электро- и теплопроводность, коррозионно- и морозостойкость, немагнитны и не дают искры при соударениях, что позволяет эффективно их использовать для производства пружин, в том числе токопроводящих, мембран, сильфонов и других ответственных упругих элементов, инструмента для работы во взрывоопасных условиях, а также электродов для контактной электросварки. Бериллиевые бронзы имеют высокую коррозионную стойкость, хорошо противостоят атмосферным воздействиям и при высоких температурах степень их окисления существенно ниже в сравнении с другими сплавами на основе меди; они устойчивы к агрессивным воздействиям пресной и морской воды и к межкристаллитной коррозии.

ОАО "Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов" (ОАО "КУЗОЦМ") – традиционный изготовитель продукции из медноберилиевых сплавов, бронз: БрБ2; БрКБ2,5–0,5; БрБНТ1,7, причем содержание в них дорогостоящего бериллия не превышает 2 %. Последнее важно тем, что при увеличении содержания бериллия прочностные характеристики повышаются незначительно, однако электротехнические и пластические характеристики падают весьма ощутимо.

При легировании бериллиевых бронз никелем и кобальтом (0,2...0,5 %) фазовые превращения при термообработке замедляются, что особенно важно при закалке крупных изделий, т.е. при невозможности ее быстрого проведения; кроме этого, оба элемента замедляют процесс рекристаллизации сплава, что приводит к повышению однородности структуры.

Закалка холоднодеформированных заготовок с температуры 780...800 °С в воду существенно снижает прочностные и повышает пластические свойства, и при получении изделий даже сложной формы заготовки легко выдерживают холодную пластическую деформацию, в частности операции холодной штамповки.

Искусственное старение при температуре 300...320 °С, в процессе которого происходит дисперсионное твердение вследствие выделения из твердого раствора и коагуляции фаз-упрочнителей, приводит к максимальным показателям твердости и прочности; следовательно, изменяя режимы ТДО, можно получить требуемое соотношение пластических и прочностных характеристик.

Благодаря высоким служебным свойствам, удовлетворяющих строгим требованиям, предъявляемым к различным деталям, медноберилиевые сплавы широко используются как конструкционные материалы. Эффективное их применение в качестве электротехнических материалов значительно расширило область их назначения. Например, одним из ключевых направлений является использование этих бронз для изготовления электродов контактной сварки, где требуется сочетание электропроводности и прочности, и что особенно важно – низких значений ползучести при рабочих температурах, так как через контактную поверхность электродов передаются значительные силы.

Такому комплексу требований соответствуют три выпускаемые заводом бронзы, при этом БрКБ2,5–0,5 с учетом удачного сочетания механических и электротехнических свойств занимает одно из ведущих мест в сравнении с российскими и иностранными аналогами. Закаленные прутки диаметром 15...40 мм, подвергнутые волочению и старению, показывают приведенные ниже служебные свойства по ГОСТ 15835–70.

Бронза БрБ2: $\sigma_в \geq 1180$ МПа; $\delta \geq 2$ %; твердость по Виккерсу ≥ 340 HV; электропроводность 22...28 % от электропроводности меди.

Бронза БрКБ2,5–0,5: твердость по Бринеллю ≥ 180 НВ; $\sigma_в$ и δ согласно ТУ не регламентированы; электропроводность 45...60 % от электропроводности меди.

Бронза БрБНТ1,7: $\sigma_в$ = 1080...1480 МПа; $\delta \geq 2$ %; твердость по Бринеллю ≥ 340 НВ; электропроводность ~27 % от электропроводности меди.

С точки зрения потребителей продукции оптимальным, в том числе экономически оправданным, является следующий дифференцированный подход к выбору сплавов с целевым комплексом служебных характеристик. Если наиболее важны прочностные свойства (при удовлетворительной электропроводности), то предпочтительны марки БрБ2, БрБНТ1,7 и БрБНТ1,9; если необходима высокая электропроводность при надлежащем уровне механических свойств, то следует использовать бронзу БрКБ2,5–0,5.

Аналогичный подход применяют и зарубежные потребители. Так, например, сплавы, выпускаемые по ASTM, делятся на две группы:

– бронзы повышенной твердости и прочности марок C17000, C17200 и C17300 с твердостью по Бринеллю 420...475 НВ и электропроводностью 20...23 % от электропроводности меди;

– бронзы повышенной электро- и теплопроводности марок C17410, C17500 и C17510 с твердостью по Бринеллю 180...300 НВ и электропроводностью 45...50 % от электропроводности меди.

В зарубежной практике электроды для контактной сварки изготовляют из бронз марок C17200 (по ASTM B 196) или CW101C (по ENBS 12163), которым соответствует бронза БрБ2, ГОСТ 18175–78; и при выполнении заказов для фирм США и Франции на прутки диаметром 15...40 мм в ОАО "КУЗОЦМ", успешно использовав опыт изготовления прутков из бронзы БрБ2, получили металлопродукцию высокого качества.

В последнее время проявилась перспективная тенденция по разработке медноберилиевых композиций, сочетающих высокие значения электропроводности и вполне приемлемые твердость и прочность. В созданных по этому направлению сплавах существенно снижено содержание бериллия (до 0,3...0,5 %) и повышено содержание кобальта или никеля (до 1,5...2 %).

Положительный пример реализации этой тенденции на заводе – производство прутков с повышенной электро- и теплопроводностью из бронзы марок C17500 (по ASTM) или CW104C (по ENBS). Характеристики этих бронз практически полностью совпадают с параметрами бронзы БрКБ2,5–0,5 (по ТУ 48-21-5049–74), из которой в ОАО "КУЗОЦМ" успешно производят прессованные состаренные (диаметром 25...95 мм) и холоднодеформированные посредством волочения (диаметром 15...25 мм) прутки, в том числе для электродов контактной сварки по заказам фирм США и Бразилии.

В опытном порядке также были изготовлены и отправлены заказчику на испытания горячепрессованные и холоднотянутые прутки диаметром 32...63 мм различных состояний поставки из сплава C17510 по стандарту ASTM.

Наталья Сергеевна Арсентьева, гл. инженер;
Александр Иванович Снигирев, начальник технического отдела;
Лев Моисеевич Железняк, канд. техн. наук;
Лариса Николаевна Марущак, технолог технического отдела;
Елена Васильевна Кузьмина, зам гл. технолога;
Ольга Леонидовна Глухова, студентка

Поздравляем!

Сергея Петровича Яковлева

Заслуженного деятеля науки и техники РФ,

доктора технических наук, профессора,

академика АПК РФ

с 75-летием

Сергей Петрович Яковлев родился в 1934 г.

С.П. Яковлев с 1963 г. и по настоящее время работает в Тульском политехническом институте (в настоящее время ТулГУ) ассистентом, старшим преподавателем, доцентом, профессором, проректором по научной работе, заведующим кафедрой технологии штамповочного производства (в настоящее время кафедра "Механика пластического формоизменения").

Успешно сочетая педагогическую, научную и общественную деятельность, С.П. Яковлев в 1972 г. защищает докторскую диссертацию. В 1973 г. он утвержден в ученом звании профессора.

С.П. Яковлев является крупным специалистом в области теории процессов обработки металлов давлением и технологии кузнечно-штамповочного производства. Им опубликовано 20 монографий и учебных пособий, справочник, более 350 научных статей, получено 13 авторских свидетельств об изобретениях.

Основным направлением научной деятельности С.П. Яковлева является разработка методов анализа и расчетов статических и динамических процессов обработки металлов давлением на основе создания обобщенных математических моделей, в которых учитываются реальные свойства анизотропии и неоднородности механических свойств материала.

С.П. Яковлев – руководитель научной школы "Теория и технология формоизменения изотропных и анизотропных упрочняющихся материалов при различных термомеханических режимах в процессах обработки давлением". Под его научным руководством защитили кандидатские диссертации более 75 человек, докторские диссертации – 18 соискателей.

В настоящее время он является членом трех диссертационных советов, научным редактором межвузовских сборников "Теория, технология и оборудование штамповочного производства" и "Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением".

По результатам научно-исследовательской работы профессор С.П. Яковлев трижды удостоен звания лауреата премии им. С.И. Мосина (1976, 2002 и 2006 гг.) в области разработок военной техники, технологии и оборудования, имеющих двойное применение.

В 1982 г. профессору С.П. Яковлеву присуждена премия Совета Министров СССР , в 1998 г. – Государственная премия РФ в области науки и техники, в 2006 г. – премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники. За большие достижения в области развития экономики России С.П. Яковлев удостоен звания лауреата премии имени А.Н. Косыгина Российского Союза товаропроизводителей (2005 г.) и премии Тульской области в области науки и техники имени академика Б.С. Стечкина (2006 г.).

За достигнутые успехи в развитии науки и техники, подготовке научных и инженерных кадров С.П. Яковлев удостоен почетного звания "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР" (1990 г.) и награжден медалью "Ветеран труда" (1984 г.), орденом "Почета" (2000 г.), медалью "300 лет Российскому флоту" (1996 г.), нагрудным знаком "Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации" (2003 г.), почетным знаком "За заслуги перед университетом" (2006 г.), юбилейной медалью за большой вклад в развитие космонавтики "50 лет космической эры" (2007 г.).

Коллектив редакции и редакционный совет поздравляют
Сергея Петровича с юбилеем!
Желаем крепкого здоровья, благополучия и творческого долголетия!

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 30.12.08 г. Подписано в печать 03.03.09 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,24. Заказ 126. 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.