

УДК 621.791.927.5:669.018.25

Кошечая А. А., Волков Д. А., Кошевой А. Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

На работоспособность инструмента для горячего прессования металлов, значительное влияние оказывают трещины в наплавленном металле, образующиеся в результате наложения различного рода внутренних напряжений [1]. С точки зрения оценки напряженно-деформированного состояния наплавленного прессового инструмента большой интерес представляют изделия типа толстостенных оболочек, наплавленных металлами, свойства которых отличаются от свойств основного металла [2]. Для оценки вероятности образования трещин представляют интерес величины и характер распределения остаточных напряжений в них, возникающих при наплавке порошковыми проволоками, в зависимости от состава наплавленного металла и условий наплавки.

Исследованию напряжений, возникших в процессе износостойкой наплавки деталей машин, и особенно, инструмента, с учетом последующей термической обработки, посвящено незначительное число работ [3, 4]. Однако имеющиеся данные подтверждают целесообразность исследования этого вопроса.

В настоящее время исследования напряженно-деформированного состояния при наплавке, относятся главным образом к изделиям простейших форм и небольших размеров. Кроме того, не всегда учитывается влияние химического состава наплавленного металла на механизм образования внутренних напряжений. При рассмотрении массивных изделий возникают трудности, связанные с большой стоимостью эксперимента и ограниченными возможностями получить исчерпывающую информацию в глубинных слоях металла экспериментальными методами.

Целью данной работы является исследование влияния химического состава металла, наплавленного порошковой проволокой на напряженно-деформированное состояние инструмента для горячего прессования трубных заготовок и установлению функциональной взаимосвязи между данными факторами.

Для достижения поставленной цели, система и основной уровень легирования, а также содержание элементов в наплавленном металле выбиралось в соответствии с [5], что соответствовало составу наплавленного металла типа 40X10B4Ф. С целью сокращения числа экспериментов, применили метод многофакторного планирования эксперимента с использованием программного продукта Statistica V6.0.437.0 (StatSoft.Inc. 2001) [6, 7]. Выполняли построение ортогонального плана второго порядка 2^3 (табл. 1), в котором интервалы варьирования концентрации легирующих элементов (С, Cr, W) выбирали на основе предварительных экспериментов по влиянию отдельных легирующих элементов на параметры оптимизации [8]. Все остальные элементы наплавленного металла были взяты в следующих пределах в %: Si = 0,27–0,34; Mn = 0,65–0,75; V = 0,17–0,25; Ti = 0,17–0,25 [5].

Экспериментальную наплавку рабочих втулок, с внутренним диаметром 150 мм, наружным 250 мм и длиной 470 мм из стали 38ХНЗМФА осуществляли по всей толщине внутренней поверхности до достижения слоя с максимальной толщиной 20 мм и расположением валиков по винтовой линии с шагом 9 мм (рис. 1, а, б). Это обеспечивало степень перекрытия валиков – 0,4 (рис. 1, в). Наплавку выполняли самозащитными порошковыми проволоками с постоянным содержанием газо-шлакообразующих составляющих наполнителя и с таким составом его легирующей части, при котором обеспечивается получение состава наплавленного металла в соответствии с матрицей планирования экспериментов (табл. 1).

Режим наплавки следующий: напряжение на дуге 24–26 В, сварочный ток 270–290 А, скорость наплавки 18 м/ч при диаметре порошковой проволоки 3,0 мм, постоянным током обратной полярности, жесткой внешней вольтамперной характеристике источника питания, без предварительного или сопутствующего подогрева втулок и с последующим после наплавки их охлаждением на спокойном воздухе.

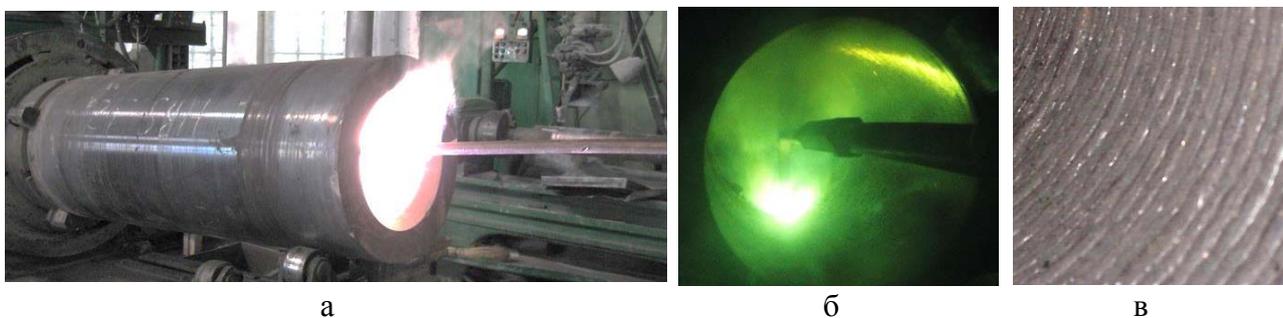


Рис. 1. Экспериментальная наплавка рабочих втулок инструмента для горячего прессования металлов:

а – общий вид установки для наплавки втулок; б – зона горения дуги; в – рельеф наплавленной поверхности

План-матрица эксперимента и ее реализация, полученная с помощью системы Statistica (StatSoft) представлена в табл. 1.

Таблица 1

План-матрица эксперимента и ее реализация

№ опыта	Факторы			Отклик	
	содержание элементов, %			максимальные упругие деформации	максимальные остаточные напряжения
	X ₁ ([%C])	X ₂ ([%Cr])	X ₃ ([%W])	γ_{ϵ}^{max}	γ_{σ}^{max} , МПа
1	0,300000	8,500000	3,400000	0,006336	1704,3
2	0,300000	8,500000	4,600000	0,007071	1902
3	0,300000	12,500000	3,400000	0,006699	1802
4	0,300000	12,500000	4,600000	0,009293	2499,7
5	0,600000	8,500000	3,400000	0,007023	1889,2
6	0,600000	8,500000	4,600000	0,008591	2311,1
7	0,600000	12,500000	3,400000	0,007424	1997,9
8	0,600000	12,500000	4,600000	0,007626	2051,3
9	0,450000	10,500000	4,000000	0,007281	1958,6

Определялись относительные величины упругих деформаций втулки в радиальном (ϵ_r) и тангенциальном (ϵ_{θ}) направлениях, по которым расчетным путем определялись остаточные напряжения по этим направлениям σ_r и σ_{θ} .

Измерение упругих деформаций производилось съемным механическим деформометром с базой измерения, равной 15 мм. Замеры упругих деформаций выполнялись на торцевой поверхности наплавленной рабочей втулки по двум перпендикулярным направлениям в четырех полях, согласно схеме, показанной на рис. 2. Первый отсчет с измеряемых баз снимался после наплавки и полного остывания рабочей втулки. Затем измеряемые базы

механическим путем рассекались на глубину до 8 мм. После этого производилось повторное измерение размеров баз. Относительная величина упругой деформации оценивалась по разности показаний деформометра, отнесенной к исходной величине базы. Измерение каждой базы производилось по 3–5 раз механическим деформометром с индикаторной головкой 0,001 мм. Ножки деформометра базировались в конические отверстия с конусностью 60° и с наружным диаметром $2,2 \pm 0,5$ мм (рис. 2, сечение Б-Б). Базовые отверстия после зашлифовки очищались от крупных механических частиц ватным тампоном, обкатывались стальным шариком диаметром 2,0 мм и окончательно протирались ватным тампоном, смоченным в ацетоне.

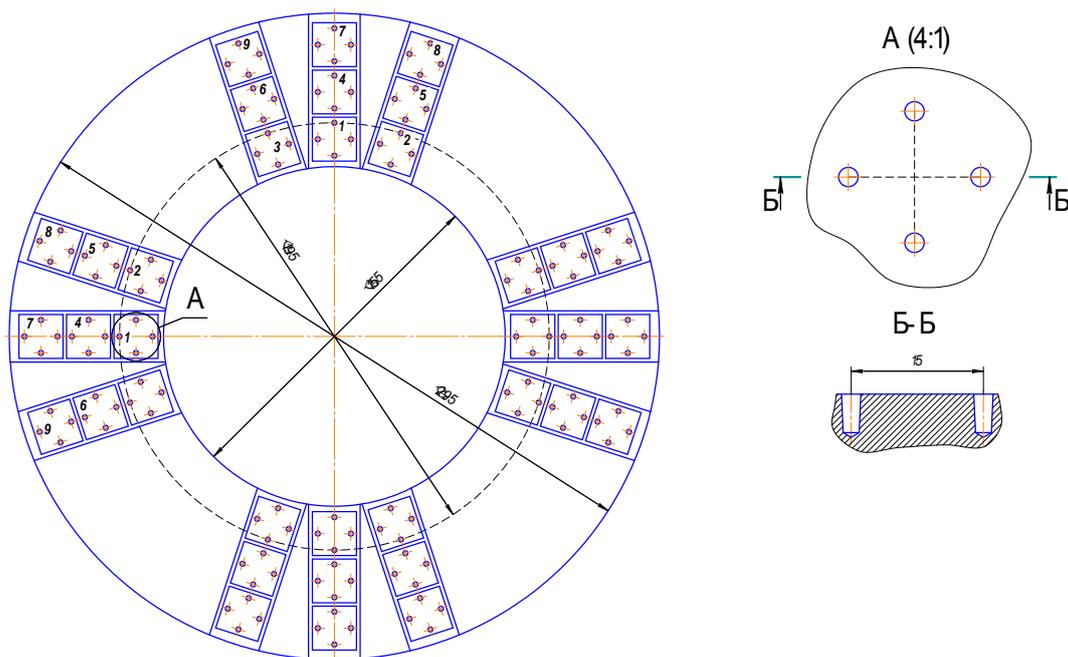


Рис. 2. Схема расположения баз измерения упругих деформаций на торцевой поверхности рабочей втулки

Контроль установки деформометра перед измерением производили по эталонной базе 15 мм. Разрезка на фибры производилась на фрезерном станке при подачах и охлаждении, обеспечивающих отсутствие нагрева и пластических деформаций металла при разрезке.

Расчет остаточных напряжений в наплавленных рабочих втулках производился на основе проведенных замеров после сварки и после разрезания, по формулам:

$$\sigma_{\theta} = \frac{E(\varepsilon_{\theta} + \nu \varepsilon_r)}{1 - \nu^2}, \quad \sigma_r = \frac{E(\varepsilon_r + \nu \varepsilon_{\theta})}{1 - \nu^2}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости;

ν – коэффициент Пуассона, который для всех опытных сталей принимался равным 0,3;

ε_{θ} и ε_r – относительные упругие деформации вдоль осей X и Y, которые вычисляются по формулам:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{l'_{\theta} - l''_{\theta}}{L_6}, \quad \varepsilon_r = \frac{l'_r - l''_r}{L_6}, \quad (2)$$

где l'_{θ} и l'_r – данные замера баз на втулке до резки;

l''_{θ} и l''_r – данные замера баз на втулке после разрезания;

L_6 – база разрезания (15 мм).

Полученные значения относительной упругой деформации, а также рассчитанные напряжения, для рабочей втулки, наплавленной составом металла по основному уровню легирования, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения относительной упругой деформации и расчетные значения напряжений для рабочей втулки

Номер точки замера по рис. 2	Расстояние от края наплавки до центра замера, мм	Значения относительной упругой деформации		Расчетные значения напряжений	
		ε_θ	ε_r	σ_θ , МПа	σ_r , МПа
1	8	0,007266	0,002733	1954,8	1187,7
2	13	0,007266	0,002533	1924,3	1134,5
3	18	0,007260	0,00233	1925,8	1091,0
4	24	-0,007460	0,00646	-1334,9	1037,0
5	30	-0,006760	0,00640	-1170,1	1011,0
6	36	-0,005460	0,00546	-909,0	882,9
7	42	-0,005060	0,00506	-855,8	818,3
8	48	-0,004200	0,00353	-759,1	524,5
9	54	-0,00353	0,00246	-667,2	324,4

По данным табл. 2 построили эпюры распределения остаточных напряжений σ_θ и σ_r в рабочей втулке, наплавленной без предварительного подогрева, рис. 3.

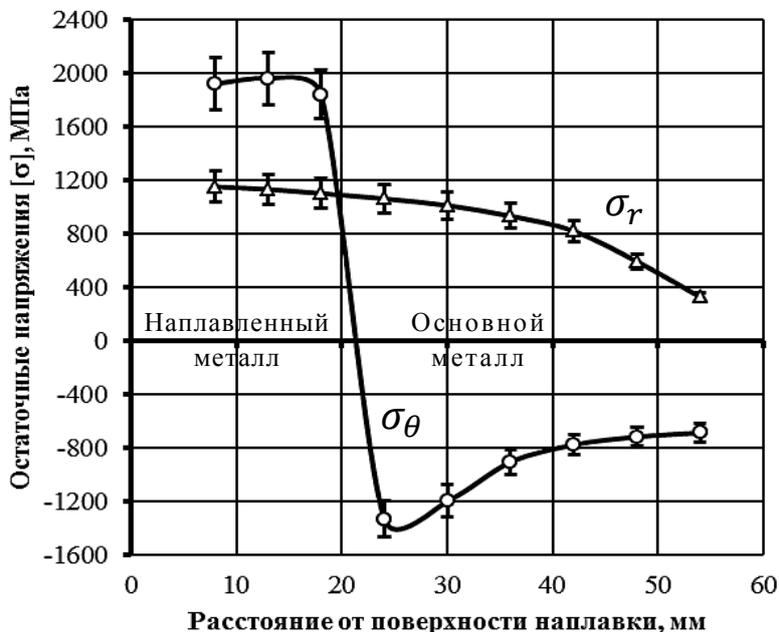


Рис. 3. Эпюры распределения остаточных напряжений

Как следует из данных табл. 2 и рис. 3, σ_θ по толщине втулки изменяют знак, причем достигают высоких значений как напряжений растяжения – в наплавленном слое, так и напряжений сжатия – в основном металле. Максимальные значения напряжения растяжения близки к пределу прочности металла наплавки, который равен $\sigma_B = 2500$ МПа (непосредственно после наплавки без последующей термической обработки). В дальнейшем будем обозначать

их символом – σ_{θ}^{max} . Значение σ_r убывает с удалением от наплавленного слоя и максимальные их величины – σ_r^{max} значительно меньше, чем σ_{θ}^{max} . Поэтому при исследовании влияния химического состава наплавленного металла на напряженно-деформированное состояние нами в дальнейшем будут рассматриваться только значения σ_{θ}^{max} .

После реализации план-матрицы эксперимента (табл. 1) были определены, коэффициенты регрессии, построены контурные графики и определены основные статистические характеристики модели с помощью системы Statistica (StatSoft). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты модели и статистические характеристики

Фактор	Regr. Coefficients; Var.:G ^{max} ; R-sqr=,99334; Adj:,9467 (Напряжения) 2**(3-0) design; MS Residual=3317,051 DV: G ^{max}					
	Regressn Коэффиц	Std.Err.	t(1)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	9643,0	2319,892	4,15665	0,150301	-19834,1	39119,99
(1)C	-19009,3	4890,782	-3,88677	0,160315	-81152,6	43133,94
(2)Cr	-947,7	217,041	-4,36636	0,143329	-3705,4	1810,09
(3)W	-2445,5	573,559	-4,26368	0,146662	-9733,2	4842,29
1 by 2	2059,8	457,562	4,50166	0,139159	-3754,1	7873,67
1 by 3	5749,3	1209,168	4,75479	0,131967	-9614,6	21113,28
2 by 3	285,1	53,660	5,31317	0,118434	-396,7	966,92
1*2*3	-603,1	113,125	-5,33149	0,118036	-2040,5	834,26

В результате обработки экспериментальных данных было построено следующее уравнение регрессии:

$$\sigma_{\theta}^{max} = 9643,0 - 19009,3[\%C] - 947,7[\%Cr] - 2445,5[\%W] + 2059,8[\%C][\%Cr] + 5749,3[\%C][\%W] + 285,1[\%Cr][\%W] - 603,1[\%C][\%Cr][\%W] \quad (3)$$

Проверка этого уравнения по критерию Фишера показала его адекватность для 5 %-го уровня значимости. Из анализа уравнения регрессии (3) следует, что влияние отдельных легирующих элементов на максимальные значения упругих деформаций и остаточных напряжений проявляется нелинейно. Для отдельных составов наплавки σ_{θ}^{max} могут достигать достаточно высоких значений, превышающих пределы прочности этих металлов. В связи с этим такие металлы наплавить без трещин невозможно, если не применять технологические меры, снижающие величину остаточных напряжений.

На основе уравнений регрессии построены кривые равных максимальных остаточных тангенциальных напряжений в наплавленных втулках в зависимости от химического состава металла наплавки (рис. 4). Из которых следует, что при постоянном содержании в металле наплавки вольфрама, равном 4 % и содержании хрома до 10 % повышение содержания углерода вызывает увеличение σ_{θ}^{max} в пределах $(19-20,5) \cdot 10^2$ МПа.

Дальнейшее повышение содержания хрома до 12 % практически не оказывает влияния. При постоянном количестве хрома в металле наплавки, равном 10,5 % (рис. 4, б) и увеличении содержания вольфрама от 3,4 до 4,0 % с ростом количества углерода наблюдается незначительное увеличение σ_{θ}^{max} – в пределах $(18-19) \cdot 10^2$ МПа. С дальнейшим повышением концентрации вольфрама до 4,6 % происходит резкое увеличение σ_{θ}^{max} до 2 200 МПа при одновременном увеличении углерода. При постоянном содержании углерода, равном 0,45 %

(рис. 4, в) и хрома, взятом в пределах (8,5–12) % с увеличением количества вольфрама во всем исследованном диапазоне происходит повышение σ_{θ}^{max} . При том же постоянном содержании углерода и изменении вольфрама в пределах (3,4–4,6) % наблюдалось незначительное увеличение σ_{θ}^{max} с ростом количества хрома в наплавленном металле.

В целом, в зависимости от содержания легирующих элементов, в исследованных пределах, σ_{θ}^{max} изменяется в диапазоне $(1,8-2,2) \cdot 10^2$ МПа, что с учетом напряжений, возникающих при эксплуатации втулок, может существенно влиять на образование трещин в наплавленном слое, а, следовательно, и работоспособность наплавленных втулок. Это обусловлено главным образом, тем, что остаточные внутренние напряжения должны взаимодействовать с внутренними напряжениями, возникающими при термическом циклировании в условиях работы наплавленного инструмента и влиять на разгарстойкость металла рабочей поверхности.

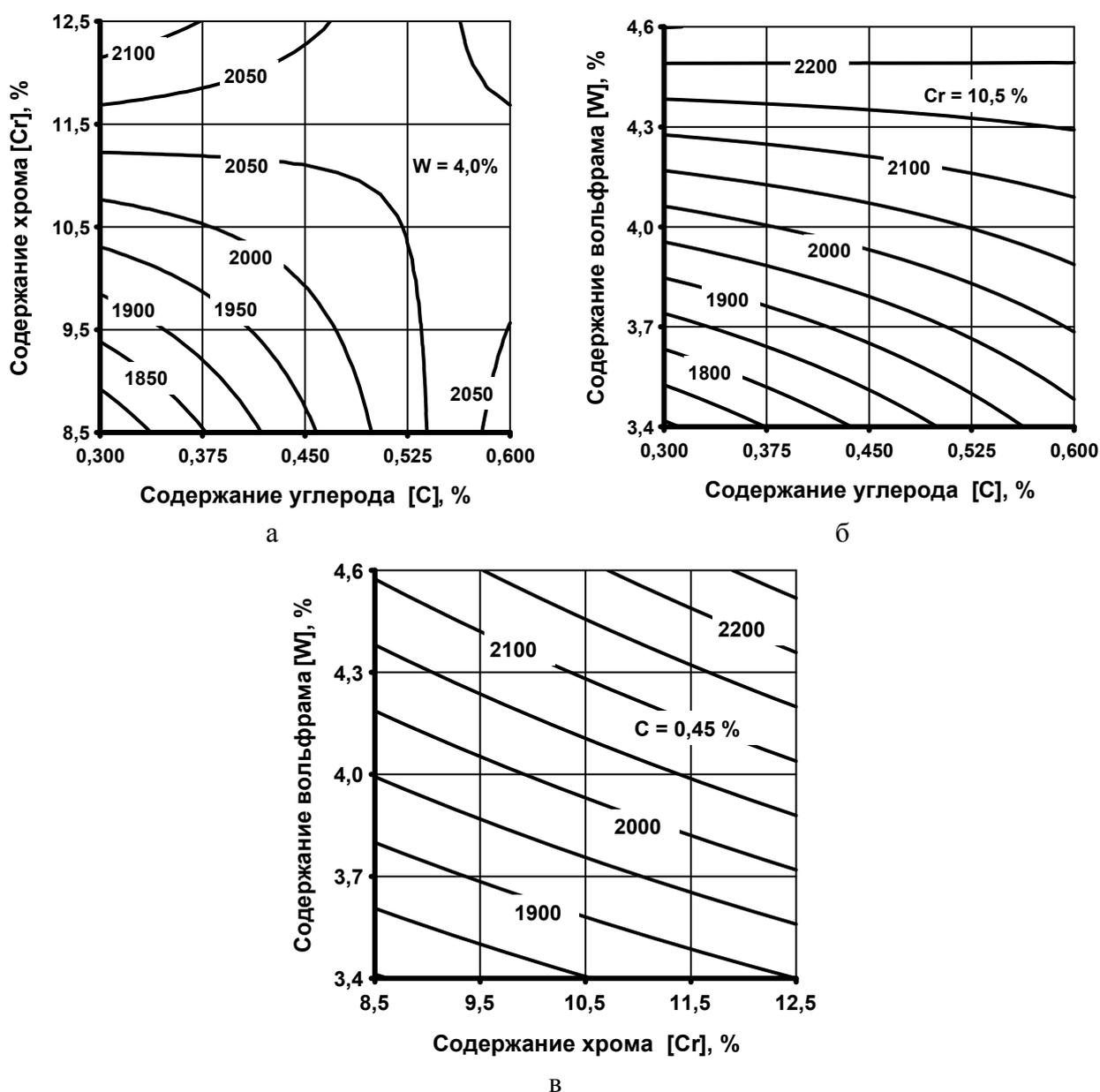


Рис. 4. Контурные графики максимальных остаточных тангенциальных напряжений в рабочей втулке в зависимости от химического состава наплавленного металла:

а – при постоянном содержании вольфрама [W] = 4,0 %; б – при постоянном содержании хрома [Cr] = 10,5 %; в – при постоянном содержании углерода [C] = 0,45 %

В работе [5] упоминалось, что при увеличении значений остаточных напряжений в наплавленном металле наблюдается тенденция снижения разгаростойкости. Поэтому с целью их снижения необходимо применение ряда технологических мер воздействия на наплавленный и основной металлы, основными из которых является термическая обработка.

Таким образом, из данных по исследованию влияния состава наплавленного металла на величину остаточных напряжений, образующихся в рабочих втулках горизонтальных прессов в результате их наплавки, установлено, что наибольших значений достигают тангенциальные напряжения и их величину можно уменьшить путем снижения содержания углерода, а также вольфрама и хрома. Кроме того, снижение величины остаточных напряжений в наплавленном инструменте положительно влияет на разгаростойкость металла наплавки.

ВЫВОДЫ

1. Теоретически доказана и экспериментально подтверждена зависимость между химическим составом, фазовым и структурным состоянием металла, наплавленного порошковой проволокой и уровнем максимальных остаточных тангенциальных напряжений в рабочей втулке, работающей в условиях горячей обработки металлов давлением.

2. Разработана математическая модель и построено уравнение регрессии ее описывающее, что позволило установить характер влияния основных легирующих элементов, таких как углерод, вольфрам и хром на остаточные напряжения в наплавленном металле.

3. На основании анализа полученной модели установлено, что при постоянном содержании в металле наплавки вольфрама, равном 4 % и содержании хрома до 10 % повышение содержания углерода вызывает увеличение σ_{θ}^{max} в пределах $(19-20,5) \times 10^2$ МПа и дальнейшее повышение содержания хрома до 12 % практически не оказывает влияния на уровень остаточных напряжений. При том же постоянном содержании углерода и изменении вольфрама в пределах (3,4-4,6) % наблюдалось незначительное увеличение σ_{θ}^{max} с ростом количества хрома в наплавленном металле.

4. Снизить величину остаточных напряжений, образующихся в рабочих втулках горизонтальных прессов в результате их наплавки, можно путем снижения содержания углерода, а также вольфрама и хрома в шихте порошковой проволоки без ущерба для разгаростойкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Причины выхода из строя рабочих втулок при прессовании трубных заготовок на гидравлических прессах / А. Г. Гринь, В. А. Пресняков, И. А. Бойко, С. М. Волков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук.праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 1 (7Е). – С. 27–32. – ISSN 1993-8322.
2. Гулаков С. В. Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский. – Мариуполь : Издательство ПГТУ, 2005. – 170 с. – ISBN 966-604-058-1.
3. Минимизация напряжений в наплавленном металле при восстановлении наплавкой оборудования химических производств / И. В. Арефьев [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 8. – С. 36–39. – ISSN 1684-2561.
4. Моделирование структурного состояния и напряжений в прокатных валках при индукционной закалке / Е. Б. Бочектуева [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – № 9. – С. 40–43. – ISSN 0026-0819.
5. Разработка состава порошковой проволоки для дуговой экономнолегированной наплавки сплава с высокой термической стойкостью / А. А. Кошечкина, В. В. Чигарев, Д. А. Волков, А. Д. Кошевой // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук.праць. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – № 3 (28). – С. 159–164. – ISSN 1993-8322.
6. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 167 с.
7. Боровиков В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с. : ил. – ISBN 5-272-00078-1.
8. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1983. – 527 с.