

$$C_{н.т} = C_{н.и} - C_{н.т} = 0,9D_{из}K_{т.н}C_{н}\frac{N}{n}.$$

Общий экономический эффект по заработной плате станочников и наладчиков составит:

$$C_{общ} = C_{эк.т} + C_{эк.н} = 0,57D_{из}K_{т}NC_{т}t_{н}N + 0,9D_{из}K_{т.н}C_{н}\frac{N}{n}$$

или

$$C_{общ} = D_{из}K_{т}\left(0,57C_{т}t_{н}N + 0,9C_{н}t_{н}\frac{N}{n}\right).$$

Суммируя экономическую эффективность технологической подготовки производства и экономии заработной платы станочников и наладчиков, можно получить общий экономи-

ческий эффект в результате внедрения в производство типовых технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Эффективность** капитальных вложений в условиях рынка: Методы расчета / В. В. Ширшова, Л. И. Мацкевич, Ю. Д. Мороз. – Мн.: НИК «Маркетинг», 1994. – 106 с.
2. **Ресурсо- и энергосберегающие** технологии в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве / Л. М. Кожуро, А. В. Крутов, П. С. Чистосердов; Под ред. П. С. Чистосердова. – Мн.: Белорусский научный институт внедрения новых форм хозяйствования в АПК, 2003. – 248 с.
3. **Штомпель Б. Н.** Использование показателя приведенных затрат для оценки эффективности капитальных вложений в условиях рынка // Агропанорама. – 1997. – № 2. – С. 24–25.
4. **Технологическая** оснастка / М. Ф. Пашкевич, Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, В. М. Пашкевич. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2002. – 320 с.

УДК 621.793.74

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

*Канд. техн. наук, доц. СОКОЛОВ Ю. В., канд. техн. наук САДОХА М. А.,
инж. ПОПОК Д. А.*

Белорусский национальный технический университет

Вследствие технологических особенностей изготовления формообразующих деталей (матриц пресс-форм) плазменным напылением [1] напыленные покрытия имеют строение, отличное от компактного материала. Это – ярко выраженная слоистость структуры покрытий, наличие в них растворенных газов, оксидов металлов, повышенная пористость покрытий. Термическая обработка призвана нивелировать указанные недостатки и достичь высокой степени гомогенности структуры, существенно снизить уровень остаточных напряжений, увеличить прочность сцепления покрытий с основой (в случае, когда речь идет о защитных или упрочняющих покрытиях). Распространение получили такие виды термообработки, как оплавление [2] и отжиг [3]. Назначение операции оплавления сводится к снижению пористости покрытий, повышению их коррозионной и износостойкости. При оплавлении покрытие нагревают до температуры, находящейся меж-

ду температурами ликвидус и солидус, что приводит к неполному расплавлению материала покрытия. Образующаяся при этом жидкая фаза «пропитывает» пористый слой и создает плотное покрытие. Кроме того, происходит подплавление тонкого поверхностного слоя самой детали, что приводит к образованию переходной зоны на границе покрытие – подложка, которая представляет собой смесь материала покрытия с материалом детали. В результате значительно повышается прочность сцепления покрытия с основой. Однако в силу специфики процесса изготовления деталей напылением оплавление покрытий не всегда целесообразно и даже возможно [4]. Поэтому в случае формообразования для снятия термических напряжений и снижения ликвации по химическим элементам чаще используют отжиг [1] или термоциклическую обработку (ТЦО) [5, 6]. Определяющими силами ТЦО являются многократные структурные и фазовые превращения,

происходящие в покрытии вследствие термоциклических тепловых воздействий, осуществляемых путем непрерывного циклического изменения температуры. Параметры ТЦО: температурный интервал циклирования, количество циклов, скорость нагрева и охлаждения.

В настоящей работе исследовано влияние ТЦО на структуру и свойства покрытий из порошка ПР-НД42СР (NiCuBSi), выпускаемого по ТУ 14-1-3997-95. Напыление осуществляли на подложку из стали 45 в режиме формообразования, обеспечивающего возможность свободного отделения напыленного покрытия от подложки. Последнее вызвано необходимостью реализации всех условий для получения сложнополостных деталей. Процесс проводили в струе аргонно-аммиачной плазмы при мощности дуги 32 кВт, дистанции напыления 0,12 м, расходе порошка 40 г/мин. Полученные покрытия подвергали термоциклированию с верхней температурой цикла 950, 900 и 850 °С, нижней – 800 и 700 °С; количество циклов – 5, 10, 15. Температурный режим обработки выбирали исходя из необходимости нивелирования влияния внутренних напряжений и остаточной пористости на свойства покрытий, получения структуры покрытия, близкой к гомогенной. Циклирование осуществляли путем нагрева (до верхних температур) и охлаждения (до нижних температур) в двух муфельных печах. Температуру контролировали хромель-алюмелевой термопарой, зачеканенной в тело образца. Скорости охлаждения и нагрева образцов соответствовали скоростям охлаждения и нагрева муфельной печи.

По мере увеличения количества циклов наблюдаются разрыв, дробление и исчезновение межслойных границ. Повышение числа циклов, равно как и температур циклирования, способствует снижению дисперсности структурных составляющих. После десяти циклов обработки в интервале температур 850 ± 700 °С структура покрытий фрагментирована (рис. 1а). Увеличение температур циклирования до 950 ± 800 °С приводит к росту субзерен (рис. 1б), размер которых изменяется от 1,4...1,6 мкм (5 циклов) до 2,2...2,4 мкм (15 циклов). Во всех случаях наблюдается распад твердого раствора с выделением избыточных фаз (рис. 1а, б).

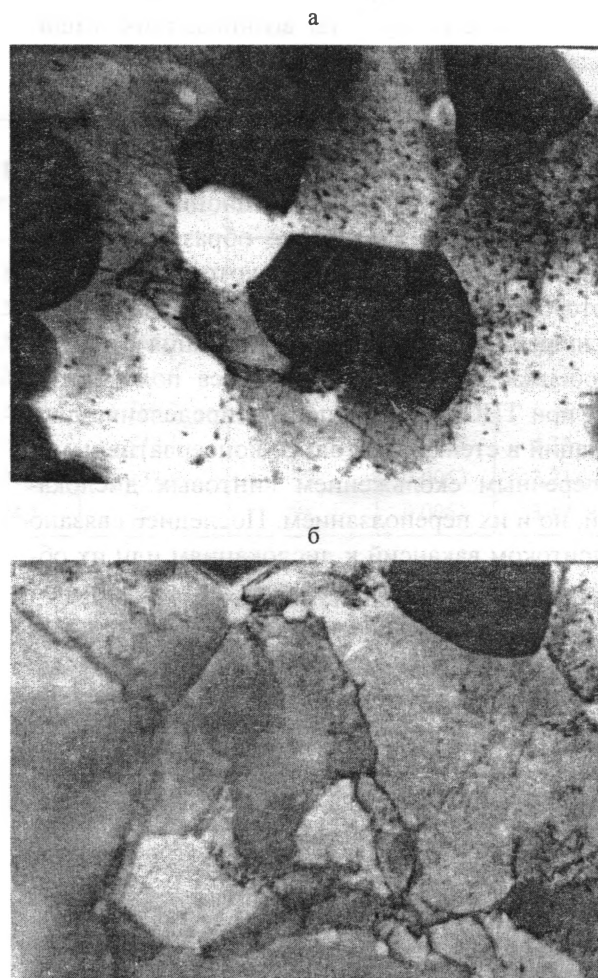


Рис. 1. Электронные микрофотографии напыленных покрытий NiCuBSi после ТЦО, × 25000: а – 850 ± 700 °С, 15 циклов; б – 950 ± 800 °С; 15 циклов

Анализ трансформации структуры покрытий после ТЦО позволяет констатировать формирование субзеренной структуры на стадии полигонизации, степень развития которой усиливается с возрастанием количества циклов. При этом средний размер пор в покрытии снижается от 14...16 мкм² (интервал циклирования – 850 ± 700 °С, 10 циклов) до 8...10 мкм² (интервал циклирования – 950 ± 800 °С, 10 циклов), тогда как после напыления размер пор в покрытии составлял 35...45 мкм². Причиной уменьшения размеров пор и повышения плотности покрытий является деформационный эффект ТЦО. Наиболее вероятен диффузионно-дислокационный механизм заживления пор, предполагающий участие в массопереносе не только вакансий и дислокаций, зарождающихся

на поверхности поры, но возникающих в наиболее напряженных участках матрицы. При этом основная роль отводится дислокационным петлям, генерируемым порами при величине напряжений, близкой к теоретической прочности матрицы [6]. Для дислокационной структуры вблизи поры характерно образование плоских скоплений, количество которых увеличивается при повышении числа циклов или расширении интервала циклирования (рис. 2). Особенностью развития процесса полигонизации при ТЦО является перераспределение дислокаций в стенках не только консервативным и поперечным скольжением винтовых дислокаций, но и их переползанием. Последнее связано с притоком вакансий к дислокациям или их образованием главным образом на ступеньках. Скорость залечивания пор выше на начальной стадии ТЦО, когда преимущественным механизмом перемещения дислокаций является их консервативное скольжение с выходом на поверхность поры. На стадии формирования полигональной структуры матрицы скорость залечивания пор понижается.



Рис. 2. Плоские скопления дислокаций около пор в напыленном слое NiCuBSi после ТЦО (950 ± 800 °C), × 20000

Ниже приведен расчет оптимальных режимов ТЦО, обеспечивающих достижение наилучшего сочетания физико-механических свойств покрытий. Для этого был реализован полный факторный эксперимент 2^3 с учетом всех возможных взаимодействий факторов. В качестве переменных факторов были выбраны: верхняя температура цикла (X_1), нижняя температура цикла (X_2), количество циклов (X_3). Основой для выбора уровней и интервалов

варьирования значений факторов (табл. 1) служили результаты предварительных исследований. Остальные факторы процесса стабилизированы на уровнях, определенных из априорной и экспериментальной информации. В соответствии с планом выполнено восемь опытов. Опыты проводили рандомизированно во времени. Каждый опыт повторяли три раза.

Таблица 1

Уровень факторов	Факторы		
	Верхняя температура цикла X_1 , °C	Нижняя температура цикла X_2 , °C	Количество циклов X_3
Основной	900	750	10
Верхний (+)	950	800	15
Нижний (–)	850	700	5

Параметрами оптимизации являлись: плотность (Y_1), твердость (Y_2), прочность на растяжение (Y_3), ударная вязкость (Y_4), износ (Y_5), пористость (Y_6).

Матрица планирования и результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Реализация матрицы планирования (табл. 2) позволила получить адекватные математические модели, которые с учетом статистической значимости коэффициентов регрессии принимают вид:

$$Y_1 = 8,280 + 0,004X_1 - 0,058X_2 - 0,043X_3 - 0,001X_1X_3 + 0,002X_2X_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = 23,49 - 0,74X_2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 511,87 + 7,55X_1 + 205,34X_2 + 4,45X_1X_2 + 109,91X_3 + 2,38X_1X_3 + 55,68X_2X_3 + 5,39X_1X_2X_3; \quad (3)$$

$$Y_4 = 227,53 + 1,59X_1 - 11,72X_2 + 139,21X_3 - 2,16X_2X_3; \quad (4)$$

$$Y_5 = 0,00639 + 0,00011X_1 + 0,00023X_2 - 0,00026X_3 - 0,00011X_2X_3; \quad (5)$$

$$Y_6 = 2,37 - 1,28X_2 + 0,21X_3 - 0,25X_2X_3 + 0,02X_1X_2X_3. \quad (6)$$

Таблица 2

Номер опыта	Переменные факторы			Параметры оптимизации					
	Верхняя температура цикла X_1 , °C	Нижняя температура цикла X_2 , °C	Количество циклов X_3	Плотность Y_1 , $\times 10^3$ кг/м ³	Твердость Y_2 , HRC ₃	Предел прочности на растяжение Y_3 , МПа	Ударная вязкость Y_4 , кДж/м ²	Износ Y_5 , м	Пористость Y_6 , %
1	+	+	+	8,30	22,5	697,7	356	0,0062	1,07
2	-	+	+	8,29	22,5	667,9	352	0,0061	1,04
3	+	-	+	8,18	24,0	365,7	383	0,0061	4,10
4	-	-	+	8,18	23,5	355,8	378	0,0057	4,13
5	+	+	-	8,38	23,0	560,7	80	0,0070	1,11
6	-	+	-	8,37	22,5	542,5	77	0,0068	1,16
7	+	-	-	8,28	24,5	253,6	99	0,0063	3,21
8	-	-	-	8,26	24,5	251,0	98	0,0061	3,17

На рис. 3 представлены номограммы, построенные по полученным математическим моделям при граничных условиях: $Y_1 \geq 8,30 \cdot 10^3$ кг/м³; $Y_2 \geq 23$ HRC₃; $Y_3 \geq 550,0$ МПа; $Y_4 \geq 180$ кДж/м²; $Y_5 \leq 0,0065$ м; $Y_6 \leq 2,5$ % в координатах $X_1 - X_2$ при фиксированных значениях X_3 . В результате анализа номограмм была определена область

оптимальных режимов проведения ТЦО покрытий:

верхняя температура циклирования – 910...930 °C;

нижняя температура циклирования – 790...820 °C;

количество циклов – 9...11.

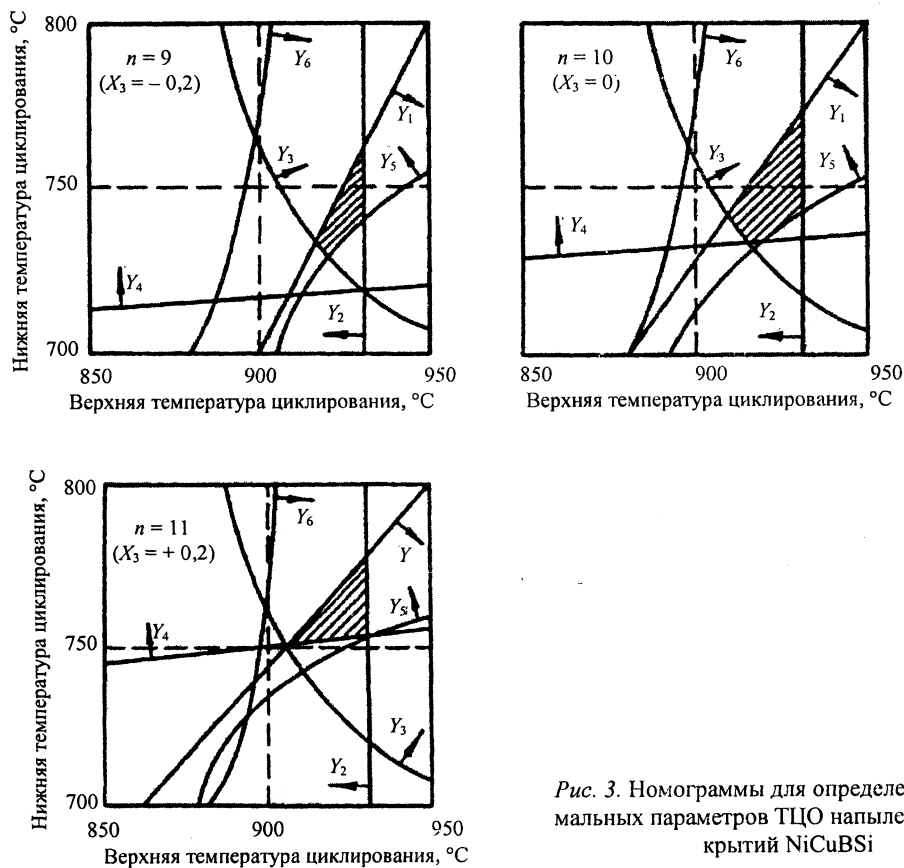


Рис. 3. Номограммы для определения оптимальных параметров ТЦО напыленных покрытий NiCuBSi

Микроструктура покрытий после напыления и ТЦО по установленному режиму представлена на рис. 4.

Видно, что в результате обработки структура покрытий становится однородной, межслойные границы исчезают, количество пор заметно сокращается. Оставшиеся мелкие поры равномерно распределены по объему покрытия.

Свойства покрытий после ТЦО по оптимальному режиму: плотность – $8,33 \cdot 10^3$ кг/м³;

твердость – 23 HRC₃; износ – 0,0061 м; предел прочности на растяжение – 593 МПа; ударная вязкость – 305 кДж/м²; пористость – 1,0 %.

Для сравнения в табл. 3 представлены свойства покрытий после изотермического отжига при температурах 750, 850 и 950 °С в течение 1 ч.

Таким образом, термоциклирование более эффективно воздействует на структуру и свойства покрытий при существенном сокращении времени обработки.



Рис. 4. Микроструктура покрытий после напыления (а) и ТЦО (б) по оптимальному режиму ($930 \rightleftharpoons 740$ °С, 10 циклов), $\times 400$

Таблица 3

Температура отжига, °С	Свойства			
	Плотность, $\times 10^3$ кг/м ³	Предел прочности на растяжение, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²	Пористость, %
750	8,22	280	130	3,2
850	8,24	315	135	2,8
950	8,28	390	193	2,5

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Ю. В., Кочан Г. В. Технологические аспекты процесса изготовления матриц пресс-форм напылением и пути его совершенствования. – Мн.: БелНИИТИ, 1990. – 28 с.
2. Исследование структуры и свойств никелевых порошковых покрытий после оплавления / В. А. Клименков, В. Е. Панин, В. П. Безбородов и др. // ФХОМ. – 1997. – № 6. – С. 68–75.
3. Борисов Ю. С., Фишман С. П. Влияние высокотемпературного отжига на структуру металлизационных плазменных покрытий // Защит. покрытия на металлах. – 1974. – № 8. – С. 118–121.
4. Особенности формирования структуры покрытий

при напылении на сталь композиционного материала ни-хром-алюминий / Ю. С. Борисов, Ю. В. Соколов, Г. В. Кочан, В. Р. Калиновский // Автоматическая сварка. – 1989. – № 4. – С. 11–14.

5. Особенности формирования структуры напыленных покрытий из порошка быстрорежущей стали при термоциклической обработке / Р. Л. Тофпенек, Ю. В. Соколов, Г. И. Залужный, Д. А. Попок // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 2. – С. 23–26.

6. Механизм и кинетика заживления пор при термоциклической обработке напыленных покрытий / Р. Л. Тофпенек, Ю. В. Соколов, Г. И. Залужный, Д. А. Попок // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1999. – № 2. – С. 10–13.