

УДК 621.7.9.048.7

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

*д-р техн. наук, проф. О.Г. ДЕВОЙНО, канд. техн. наук, доц. М.А. КАРДАПОЛОВА,  
Е.В. СУХАНОВА, О.В. ДЬЯЧЕНКО*

*(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Исследовано влияние способа оплавления (объемный и локальный) и фазового состава покрытий системы Ni - Cr — В - Si на остаточные напряжения. Остаточные напряжения 1 ряда измеряли в металлической составляющей покрытий методом рентгеноструктурного анализа и расчетным методом упругой деформации покрытий. Как следствие различия величин теплового сжатия покрытия металла - основы после кристаллизации покрытия.*

Самофлюсующиеся никелевые сплавы находят большое применение для восстановления-упрочнения широкой номенклатуры деталей благодаря высокой коррозионной износостойкости [1]. Гранулированный порошок сплава наносят на подготовленную основу методами газотермического напыления с последующим оплавлением слоя. Состав сплава обеспечивает сравнительно низкую температуру плавления (~1300 К) и образование монолитного соединения с основой.

Использование для оплавления слоя локального источника нагрева (лазерного луча) позволило восстанавливать ряд деталей (крупногабаритных, тонкостенных, сложной конфигурации), оплавление которых традиционными способами приводило к появлению коробления, разупрочнения основы и т.д.

Однако при значительном градиенте температур, вызванном большими скоростями нагрева и охлаждения, и локальности обработки в верхних слоях покрытий возникают значительные зональные термические напряжения. Величина этих напряжений, вызывающих коробление детали и трещины, зависит не только от скорости охлаждения, но и от величины коэффициента термического расширения (КТР) покрытия и основы, усадки сплава, его свойств (пластичности и теплопроводности).

Самофлюсующиеся сплавы структурно-чувствительны к температурным изменениям. После оплавления локальным источником нагрева матрица ( $\gamma$ -никель) имеет период решетки на 20...25 % больше, чем после оплавления объемным источником нагрева. Структура состоит из  $\gamma$ -Ni (40...60 %), боридов хрома Cr<sub>2</sub>B, боридов никеля Ni<sub>3</sub>B, которые находятся в виде пластинчатой эвтектики ( $\gamma$ -Ni + Ni<sub>3</sub>B) и карбидов хрома, составляющих, в основном, квазиэвтектику ( $\gamma$ -Ni + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). Коэффициенты термического расширения фазовых составляющих колеблются в широких пределах, а фазовый состав покрытий зависит от режимов локальной обработки (рис. 1).

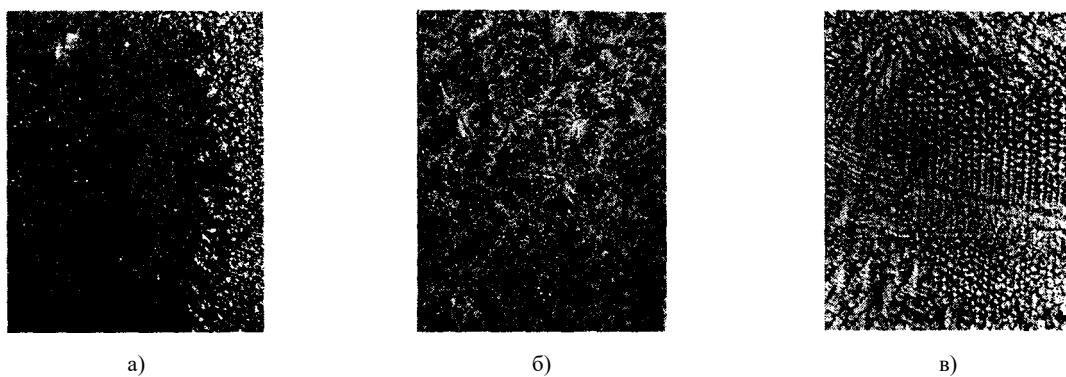


Рис. 1. Микроструктура самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ после различных режимов оплавления лучом лазера (x500):  
а - D = 1 мм; V = 1,6 мм/с; б - D = 2 мм; V = 3,3 мм/с; в - D = 1 мм; V = 0,5 мм/с

**Целью исследования** является изучение зависимости остаточных напряжений от фазового состава сплава.

**Методика исследований.** Самофлюсующийся сплав ПГ-СРЗ (ГОСТ 21448-75), который дополнительно легировали на стадии плазменного напыления в виде механических смесей (до 30 % об. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) и на стадии оплавления в виде предварительного нанесения на напыленное покрытие обмазок на основе аморфного бора и окиси хрома, наносили на цилиндрические образцы стали 3 диаметром 20 и высотой 10 мм. Толщина покрытия была меньше толщины образца на 1,5...2 порядка, что исключает деформацию об-

разца в результате действия напряжений. Оплавление покрытий производили с использованием лазерного излучателя ЛГН-702 мощностью 800 Вт. Для сравнения часть покрытий оплавливали пламенем горелки. Остаточные напряжения I ряда измеряли в металлической составляющей покрытий методом рентгеноструктурного анализа. Одновременно изучали фазовый анализ покрытий. Расчет остаточных напряжений производили по формуле пористой обратной съемки:

$$(\sigma_1 + \sigma_2) = -\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot \frac{E}{\mu} = \frac{\alpha_{зм} - \alpha_{напр}}{\alpha_{зм}} \cdot \frac{E}{\mu},$$

где  $\sigma_1 + \sigma_2$  – сумма главных напряжений в плоскости, параллельной поверхности покрытия, МПа;  $\alpha_{зм}$ ,  $\alpha_{напр}$  – соответственно экстраполированный период решетки ненапряженного эталона и твердого раствора  $\gamma$ -Ni в покрытии, нм;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона твердого раствора.

Таким образом, результатом расчета явились величины главных напряжений, действующих в объеме, не превышающем глубины поглощения рентгеновских лучей (не более 10 мкм), в плоскости, параллельной поверхности образца. При этом можно оценить изменение напряженного состояния в зависимости от направления движения лазерного луча.

Расчет периода решетки производили методом экстраполяции с использованием метода наименьших квадратов по программе PERCUB, входящей в состав пакета программ «ARSANAL». Средняя квадратичная погрешность составляла  $\pm 0,01$  нм; таким образом, напряжения определены с погрешностью  $\pm 40...50$  МПа.

Смещение линий никеля на рентгенограмме наблюдалось под действием двух факторов: остаточных напряжений и легирования твердого раствора в процессе лазерного оплавления. Ненапряженным эталоном мог бы служить только материал каждого из исследуемых покрытий, отделенный от подложки, приведенный в ненапряженное состояние, но полностью сохранивший отличия своего состава от прочих сплавов. Поэтому плоский торец цилиндрического образца после термообработки подвергали обточке твердосплавным резцом таким образом, чтобы периферийная часть покрытия шириной 4 мм была превращена в хрупкую стружку, которую просеивали через сито с ячейкой 0,2 мм для исключения в эталоне крупных частиц пластически деформированного металла.

Съемку производили на дифрактометре Дрон-3,0 в медном излучении с графитовым монохроматором. Сплавы снимали до получения восьми линий никеля (последняя (420), © свыше 76 град).

Результаты и их обсуждение. После газопламенного оплавления покрытия ПГ-СРЗ объемное охлаждение приводит к росту в сплаве эвтектических колоний (рис. 2). Равномерная усадка сплава и небольшая разница КТР покрытия и подложки приводят к появлению небольших (до 90 МПа) растягивающих напряжений. Введение карбида хрома в механическую смесь создает в покрытии значительные остаточные напряжения сжатия (до -580 МПа), что должно положительно отразиться на работоспособности покрытия.

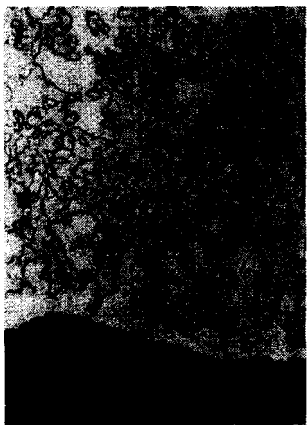


Рис. 2. Микроструктура сплава ПГ-СРЗ после газопламенного оплавления (x500)

Уровень остаточных напряжений после лазерного оплавления самофлюсующихся сплавов существенно зависит от энергии лазерного луча. При кинжальном проплавлении основы (см. рис. 1, в) напряжения минимальные, в основном, сжимающие. Если оплавление ведется без проплавления основы, то уровень остаточных напряжений тем больше, чем меньше диаметр лазерного пятна и скорость движения детали относительно пятна, причем это проявляется в более значительной степени поперек дорожек движения луча (см. рис. 1, а, б).

Введение в состав покрытия вещества, обладающего более высоким коэффициентом термического расширения, чем твердый раствор на основе никеля (КТР  $\text{Cr}_2\text{C}_3 = 11,7 \cdot 10^{-6}$  1/град, КТР никеля -  $7 \cdot 10^{-6}$  1/град) приводит к появлению значительных растягивающих напряжений, которые не достигают опасных значений, за исключением напряжений в покрытии, оплавленном при неблагоприятном сочетании медленного перемещения луча и большой ширины дорожки.

Введение аморфного бора на стадии оплавления в виде предварительно нанесенной на напыленное покрытие легирующей обмазки способствует образованию дополнительного количества легкоплавкой эвтектики  $\gamma$ -Ni +  $\text{Ni}_3\text{B}$ . Свободно перемещаясь между дендритами твердого раствора, эвтектическая смесь заполняет пустоты, «залечивает» образовавшиеся при скоростных процессах трещины. Обладая поверхностно-активными свойствами, бор не только снижает трещинообразование, но и значительно

уменьшает шероховатость, что позволяет для некоторых деталей отказаться от дорогостоящей окончательной обработки.

Бор легирует у-Ni, упрочняя его и увеличивая прочность сплава. Использование легирующей обмазки, включающей смесь аморфного бора и окиси хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  грануляцией до 10 мкм, позволяет, кроме вышеречисленных преимуществ, повысить в 2...3 раза износостойкость покрытия. Часть окиси восстанавливается бором до металлического хрома, образуя дополнительное количество боридов хрома  $\text{Cr}_2\text{B}$ . Наличие в покрытии больших количеств веществ с коэффициентом термического расширения, превышающим КТР никеля, приводит к возникновению растягивающих напряжений, близких к пределу прочности самофлюсующегося сплава. Значения остаточных напряжений растяжения, получаемых в результате подобных измерений (охватывающих поверхность, намного превышающую поверхность одного зерна или кристаллита), не могут превышать предела прочности исследуемого материала (точнее, его металлической матрицы - легированного никеля). Реальные напряжения, созданные различием КТР подложки и покрытия (при объемном нагреве) и усадкой сплава в сочетании с различием КТР подложки и покрытия (при локальном нагреве), могли быть значительно больше измеренных, но их превышение над пределом прочности реализовалось в процессе охлаждения покрытия после лазерной обработки в форме микроразрушения, т.е. образования системы микротрещин. Самофлюсующийся сплав, в котором матрица недостаточно упрочена, покрывается сетью трещин, так как предел прочности на растяжение поликристаллического никеля составляет от 345 до 560 МПа [1].

Рентгеновский фазовый анализ покрытий позволил определить природу влияния фазового состава покрытия на уровень остаточных напряжений в виде корреляционного анализа (табл. 1).

Таблица 1

Коррелирующие факторы и коэффициенты корреляции для покрытий на никелевой основе

Состав покрытия, способ оплавления	Сумма главных напряжений, МПа	Объемный % фаз в покрытии			
		металлическая составляющая	бориды никеля	бориды хрома	карбиды хрома
ПГ-СРЗ, оплавление лучом лазера	-250	39,5	52,3	1,5	6,7
ПГ-СРЗ + 30 % $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , оплавление горелкой	-580	45	36,2	3,8	15
ПГ-СРЗ, оплавление горелкой	+80	27,4	45,9	16,1	1,8
ПГ-СРЗ + 30 % $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , оплавление лучом лазера	+150	51	25,6	11,3	12,1
ПГ-СРЗ с обмазкой $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{B}$ , оплавление лучом лазера	+510	38,5	31	17,5	0

Статистический анализ					
Корреляция	$\alpha$	0,05	0,05	0,05	0,1
	$\tau$ табличное	0,896	0,896	0,896	0,775
	$\tau$ опытное	-0,200	-0,402	+0,863	-0,732
	Наличие линейной корреляции	нет	нет	есть	есть

Очевидно, соотношение объемов металлической и металлоподобных фаз само по себе не влияет на напряженное состояние покрытий (это соотношение почти неизменно остается на уровне 4/5...1/1).

Определяющую роль играет природа металлоподобных фаз, содержащих хром, – напряженное состояние тем благоприятнее, т.е. сильнее смещено в сторону сжатия, чем меньше в покрытии боридов хрома и больше его карбидов. Это объясняется, видимо, большим различием КТР этих фаз (табл. 2).

Таблица 2

Средние коэффициенты термического расширения в интервале температур 273...1273 К

Состав материала	X20H80	Сталь 20	Бориды никеля	$\text{Cr}_2\text{B}$	$\text{Cr}_2\text{C}_3$	$\text{Cr}_2\text{C}_6$
КТР средний, $\alpha \cdot 10^6$ 1/град	17,2	13,5	12	15	11,7	10,1

Наличие данных по фазовому составу покрытий в сочетании с данными об остаточных напряжениях позволило проверить последнее, рассчитав их без применения рентгеноструктурного анализа.

При расчете исходили из следующих положений:

1. Остаточные напряжения I ряда, приводящие к упругой деформации покрытия, есть следствие различия величин теплового сжатия покрытия металла - основы после кристаллизации покрытия.
2. Коэффициент теплового сжатия (расширения) покрытия аддитивен по фазам системы, т.е.

$$\alpha_{\text{покр.}} = \sum_{i=1}^n \alpha_{\phi}^{(i)} V_{\phi}^{(i)},$$

где  $\alpha_{\phi}^{(i)}$  – КТР  $i$ -той фазы;  $V_{\phi}^{(i)}$  – ее объемная доля в покрытии.

3. Толщина покрытия - 0,8; фазовый состав по толщине неизменен (что является, в значительной мере, произвольным допущением); сечение покрытия, подвергающееся действию напряжений, равно произведению толщины покрытия на диаметр образца, т.е. на 20 мм.

4. Длина металлического тела, на которое наносится покрытие, равна при комнатной температуре длине связанного с подложкой покрытия после его охлаждения (20 мм).

5. В момент лазерного оплавления температура материала покрытия и температура соприкасающейся с ним стали равны и составляют 1273 К (сталь находится в твердом состоянии, а покрытие в расплавленном, но кристаллизация происходит при переходе 1273-го порога). Таким образом, длина тела-подложки (как и длина закристаллизовавшегося покрытия) равна

$$L_t = L_0 (1 + \alpha_{\text{стали}} \cdot 1000) = 20(1 + 13,4 \cdot 10^{-3}) = 20,268 \text{ мм}.$$

Если бы покрытие могло свободно сжаться, его длина после охлаждения составила бы

$$L_0 = \frac{L_t}{(1 + \alpha_{\text{покр.}} \cdot 1000)} = \frac{20,268}{1,01436} = 19,981 \text{ мм}.$$

6. По закону Гука, сила, действующая в поперечном сечении покрытия, равна

$$P = \Delta L \cdot E,$$

а напряжение

$$\sigma = \frac{P}{F_{\text{покр.}}} = \frac{\Delta \alpha E}{hd}.$$

Приняв (по справочным данным) модуль упругости  $E$  равным модулю Юнга сплава Х20Н80, т.е. 22,38·10<sup>5</sup>МПа, получаем значение, превышающее рентгеновские данные на величину погрешности.

Например, для сплава ПГ-СРЗ с 30 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> получаем напряжение +266 МПа (по рентгеновским данным -220 МПа).

**Выводы.** Таким образом, уровень остаточных напряжений в покрытиях на основе самофлюсующихся никелевых сплавов сильно зависит от способа и режимов их оплавления, а также природы легирующих добавок, что в свою очередь определяется фазовым составом покрытия.

Величина остаточных напряжений определяется, в основном, количеством упрочняющих фаз - боридов и карбидов хрома - вследствие разницы коэффициентов термического расширения этих фаз и никелевой матрицы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов Л.В. Механические свойства металлов и сплавов // Структура и свойства металлов и сплавов: Справочник. Т. 2. - Киев: Наукова думка, 1986. - 82 с.