



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.793

И.А. СОСНОВСКИЙ

старший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин
НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: sos3@tut.by

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.

заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин НТЦ «Технологии
машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: mbelotser@gmail.com

А.А. КУРИЛЁНОК, канд. техн. наук

старший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин
НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: AKTO13@mail.ru

А.И. КОМАРОВ, канд. техн. наук

заведующий лабораторией технологий модифицирования конструкционных материалов НТЦ «Технологии
машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: al_kom@tut.by

Д.В. ОРДА

научный сотрудник лаборатории технологий модифицирования конструкционных материалов НТЦ «Технологии
машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: dmitry_orda@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21.11.2022.

РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ЗАГОТОВКИ С ПОКРЫТИЕМ, НАНЕСЕННЫМ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

В результате теоретического анализа процесса охлаждения деталей с наплавленными покрытиями, нанесенными методом центробежной индукционной наплавки, установлены закономерности формирования остаточных напряжений с учетом релаксации. Показано, что уменьшение скорости охлаждения после наплавки позволяет снизить уровень остаточных напряжений за счет явления релаксации. Выведены расчетные соотношения, позволяющие прогнозировать допустимую величину остаточных напряжений в зависимости от требуемой адгезионной прочности. Как показывает анализ полученных соотношений, снижения остаточных напряжений в получаемых покрытиях за счет их релаксации можно добиться путем уменьшения скорости охлаждения или увеличения его времени. В технологическом процессе индукционной наплавки использовался двухступенчатый режим охлаждения заготовки, на первом этапе охлаждения осуществляется с максимально возможным темпом. В случае достижения температурных напряжений предельно допустимой величины τ_{max} в качестве условия сопряжения для перехода из предыдущего этапа охлаждения на следующий служит равенство $\tau_{max} = \tau_i$, где τ_i определяется из выведенных в работе уравнений. При этом следует руководствоваться соблюдением условия $\tau_i < \tau_c$, где τ_c — теоретическая адгезионная прочность покрытий в отсутствии остаточных напряжений. Приведен пример практического использования двухступенчатого охлаждения после процесса нанесения покрытий

центробежной индукционной наплавкой на втулки подбивочных блоков путевой выправочно-подбивочно-рихтовочной машины.

Ключевые слова: покрытия, остаточные напряжения, релаксация, центробежная индукционная наплавка, адгезионная прочность, биметаллические детали, втулки подбивочных блоков, путевая машина ВПП

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-55-62>

Введение. В настоящее время нанесение функциональных покрытий на внутренние поверхности цилиндрических деталей находит широкое применение при их упрочнении и восстановлении. К числу наиболее простых и экономичных методов, обеспечивающих высокое качество получаемых покрытий, относится центробежная индукционная наплавка [1–5].

При реализации данного метода важную роль играет правильный выбор условий охлаждения детали, т. к. они во многом определяют прочность сцепления покрытия с основой, термостойкость биметаллической детали, температурные напряжения и деформации сегментов, возникающие при разрезке детали с покрытием, последующей механообработке и т. д. [6].

Температура и скорость ее изменения оказывают влияние на напряженное состояние детали с покрытием [6–7]: при охлаждении детали возникают термические напряжения, обусловленные различием термомеханических постоянных и градиентами температур в детали и покрытии. Кроме того, возникновение остаточных напряжений в элементах конструкций оказывает существенное влияние на работоспособность и прочностные характеристики полученных изделий.

В соответствии с вышеизложенным, целью настоящей работы являлось установление закономерностей формирования остаточных напряжений с учетом релаксации на основе теоретического анализа процесса охлаждения деталей с наплавленными покрытиями, нанесенными методом центробежной индукционной наплавки, а также использование полученных результатов теоретических исследований для практического применения.

Основные положения и допущения. Релаксация является следствием перераспределения упругой и пластической деформации. Действительно, суммарная деформация вязкоупругого тела складывается из упругой (e) и вязкой, остаточной (c) частей:

$$\gamma_i = \gamma_i^e + \gamma_i^c. \quad (1)$$

Поскольку деформация γ_i^c возрастает во времени, то при соблюдении условия $\gamma_i(0) = \text{const}$ должно уменьшиться γ_i^e . Учитывая, что $\gamma_i^e = \frac{\tau_i}{G}$, указанное условие принимает вид:

$$\dot{\gamma}_{i(0)} = \frac{\dot{\tau}_i}{G} + \dot{\gamma}_i^c = \text{const}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что постоянство деформаций $\gamma_i(0) = \text{const}$ обеспечивается за счет уменьшения во времени напряжений $\tau_i = \tau_i(t)$.

С позиции статистической физики релаксацию можно рассматривать как процесс установления статистического равновесия в физической системе, когда микроскопические величины, характеризующие состояние системы (напряжения) асимптотически приближаются к своим равновесным значениям.

Уравнение упруговязкого тела Максвелла имеет вид:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{1}{\eta} \tau_i + \frac{1}{G} \dot{\tau}_i. \quad (3)$$

Как было отмечено выше, при центробежной индукционной наплавке (рисунок 1) [1–5] возникновение остаточных напряжений происходит при охлаждении заготовки и, в основном, обусловлено различием коэффициентов термического расширения основы и покрытия.

Вместе с тем, учитывая, что в продольном направлении деформация отсутствует, а начальные упругие напряжения вследствие высокой температуры наплавки можно принять равными нулю, тогда суммарная деформация вязкоупругого тела

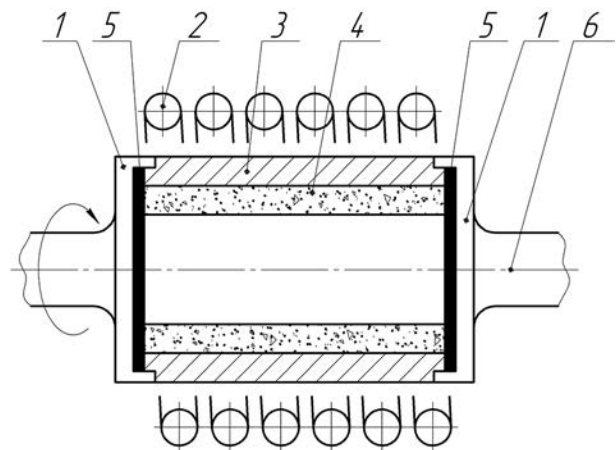


Рисунок 1 — Принципиальная схема центробежной индукционной наплавки: 1 — зажимные крышки; 2 — индуктор; 3 — деталь; 4 — наплавляемая шихта; 5 — антипригарные прокладки; 6 — ось детали

Figure 1 — Schematic diagram of centrifugal induction surfacing: 1 — clamping caps; 2 — inductor; 3 — part; 4 — surfaced charge; 5 — non-stick gaskets; 6 — axis of the part

складывается из термоупругих (T) и остаточных (C) деформаций:

$$\gamma_i = \gamma_i^T + \gamma_i^C; \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}^T = -\dot{\gamma}^C, \quad (5)$$

где γ_i^T — термоупругие деформации; γ_i^C — остаточные деформации.

Величина остаточных напряжений, при прочих равных условиях, зависит от длины и толщины покрытия. Это особенно важно учитывать при разработке технологии нанесения покрытий на длинномерные детали, где высокий уровень остаточных напряжений может явиться одной из причин преждевременного выхода детали из строя.

Методика расчета остаточных напряжений.

Для расчета остаточных напряжений в покрытиях можно использовать методику и математический аппарат теории волокнистого упрочнения.

Если в соответствии с моделью Холлистера [8–10] предположить, что покрытия нанесены на две противоположные стороны длинномерной плоской детали (двухмерная модель), покрытия и деталь деформируются упруго, между покрытиями и деталью существует идеальная связь и линии, прямые до деформации, остаются прямыми после деформации, то использование данной расчетной методики позволяет получить следующие выражения для распределения остаточных напряжений:

$$\tau_r(x) = \frac{A}{2} \sigma_{\max} \frac{sh \left[\frac{A}{2h_n} \left(\frac{l}{2} - x \right) \right]}{ch \frac{A \cdot l}{4h_n}}; \quad (6)$$

$$\sigma_n(x) = \left\{ 1 - \frac{ch \left[\frac{A}{2h_n} \left(\frac{l}{2} - x \right) \right]}{ch \frac{A \cdot l}{4h_n}} \right\}; \quad (7)$$

$$A = 2 \sqrt{\frac{h_n \left(\frac{h_d}{E_n} + \frac{2h_n}{E_d} \right)}{h_d \left(\frac{h_d}{\mu_d} + \frac{2h_n}{\mu_n} \right)}}; \quad (8)$$

где τ_r — касательное напряжение на границе раздела между покрытием и деталью; σ_n — нормальное продольное напряжение в покрытии; A — комплексный параметр соотношения геометрических характеристик покрытия и детали, а также модуля упругости и сдвига материала покрытия и детали; x — расстояние от торца покрытия до рассматриваемой точки; l — длина покрытия; h_n — толщина покрытия; h_d — толщина детали; E_n, E_d — модули упругости материалов покрытия и детали соответственно; μ_n, μ_d — модули сдвига материалов покрытия и детали соответственно.

Символом σ_{\max} в формулах (6) и (7) обозначена величина нормальных термоупругих напряжений в покрытии бесконечной длины, определяемая следующим соотношением:

$$\sigma_{\max} = \frac{[(\alpha_n - \alpha_d) \Delta T + \Delta \delta] \cdot E_n}{\left(\frac{h_n}{h_d} \right) \left(\frac{E_n}{E_d} \right) (1 - \nu_d) + (1 - \nu_n)}, \quad (9)$$

где α_n, α_d — относительные коэффициенты линейного расширения материалов покрытия и детали соответственно; ν_n, ν_d — коэффициенты Пуассона материалов покрытия и детали соответственно; $\Delta \delta = \delta_n - \delta_d$ (δ_n, δ_d — линейные деформации, вызванные структурными превращениями в материалах покрытия и детали соответственно); $\Delta T = T_{\text{пл}} - T_{\text{к}}$ ($T_{\text{пл}}$ — температура плавления материала покрытия, $T_{\text{к}}$ — температура, при которой определяется напряжение).

Как следует из анализа формул (6) и (7) касательные напряжения имеют максимальную абсолютную величину на торцах покрытия и равны нулю в его центральной части, а нормальные, наоборот, имеют максимум в центре покрытия и равны нулю на его торцах. При $l \rightarrow \infty$ касательные напряжения равны нулю, а нормальные напряжения распределены равномерно по длине покрытия и имеют максимальную величину, которая определяется выражением (9).

Поскольку обычно $h_n \ll h_d$, а упругие модули материалов покрытия и детали имеют примерно один порядок, то выражения для A и σ_{\max} можно упростить:

$$A \approx 2 \sqrt{\frac{h_n \mu_d}{h_d E_n}}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{[(\alpha_n - \alpha_d) \Delta T + \Delta \delta] \cdot E_n}{1 - \nu_n}. \quad (11)$$

При нанесении покрытия конечной длины l максимальные значения нормальных напряжений в покрытии $\tilde{\sigma}_n$ и касательных напряжений на границе между покрытием и деталью $\tilde{\tau}_r$ определяются выражениями:

$$\tilde{\tau}_r = \frac{A}{2} \sigma_{\max} th \frac{A \cdot l}{4h_n}; \quad (12)$$

$$\tilde{\sigma}_n = \sigma_{\max} \left(1 - \sec h \frac{A \cdot l}{4h_n} \right). \quad (13)$$

Среднее значение величины касательных напряжений равно нулю, поскольку в соответствии с формулой (6) они имеют различные знаки на противоположных концах покрытия. Среднее значение нормальных остаточных напряжений в покрытии σ_n определяется выражением:

$$\bar{\sigma}_n = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_n(x) dx = \sigma_{\max} \left(1 - \frac{4h_n}{A \cdot l} th \frac{A \cdot l}{4h_n} \right). \quad (14)$$

На основании соотношений (10) и (12), пренебрегая линейными деформациями, вызванными структурными превращениями в материалах покрытия и детали, получим:

$$\dot{\gamma}^T = (\alpha_n - \alpha_d) \Delta T \frac{A}{2} th \frac{A \cdot l}{4h_n}. \quad (15)$$

Как показали исследования, проведенные в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, охлаждение детали после наплавки можно аппроксимировать линейным законом:

$$\Delta T = c \cdot t, \quad (16)$$

где c — темп охлаждения, который зависит от скорости вращения, габаритов и материала заготовки и определяется экспериментально.

Тогда из (15) получим:

$$\dot{\gamma}^T = (\alpha_n - \alpha_d) \Delta T \cdot c \frac{A}{2} th \frac{A \cdot l}{4h_n}. \quad (17)$$

В то же время:

$$\gamma_i^L = \left(\frac{\tau_i}{B(t)} \right)^{\frac{1}{m}}; \quad (18)$$

$$B(t) = 2^{-m} 3^{\frac{3-m}{2}} A_0 t^b. \quad (19)$$

Тогда, воспользовавшись соотношением (19), получим:

$$(\alpha_n - \alpha_d) \Delta T \cdot c \frac{A}{2} th \frac{A \cdot l}{4h_n} = - \left[\frac{\tau_i}{B(t)} \right]^m. \quad (20)$$

Следовательно, максимальная величина остаточных касательных напряжений на границе между покрытием и основой определяется формулой:

$$\tau_i = B(t) \left[(\alpha_d - \alpha_n) c \frac{A}{2} th \frac{A \cdot l}{4h_n} \right]^m. \quad (21)$$

Для учета влияния температуры на кинетику уплотнения при центробежной индукционной наплавке можно воспользоваться принципом температурно-временной аналогии [11]. Согласно этому принципу, при переменных температурах реологическое поведение материала может быть описано уравнениями точно такой же структуры, как и при постоянной температуре, но с измененным масштабам времени. Приведенное (модифицированное) время t' вводится соотношением:

$$t' = \int_0^t \alpha_T^{-1}(T) dt, \quad (22)$$

где T — температура.

Функция $\alpha_T(T)$ определена с точностью до множителя, поэтому она выбирается таким обра-

зом, что $\alpha(T_0) = 1$, где T_0 — некоторая температура отнесения.

Если предположить, что скорость деформации порошка пропорциональна величине $e^{-\frac{Q}{kT}}$ [12], то по аналогии с результатами работы [11] получим для коэффициента редукции α_T следующее выражение:

$$\alpha_T = \left(G e^{\frac{Q}{kT}} \right)^{\frac{1}{b+1}}, \quad (23)$$

где $G = e^{-\frac{Q}{kT_0}}$; Q — энергия активации; k — постоянная Больцмана.

Для линейного закона охлаждения интегрирование этих двух формул позволяет получить выражение для определения t' в виде:

$$t' = \left(t - \frac{T_{\Pi}}{c} \right) \exp \left[\frac{Q}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\Pi} - cT} \right) \right] - \frac{T_0}{c} \exp \frac{Q}{kT_{\Pi}} \cdot \left\{ Ei \left[-\frac{Q}{k(T_{\Pi} - cT)} \right] - Ei \left[-\frac{Q}{kT_{\Pi}} \right] \right\}, \quad (24)$$

где $Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt$ — интегральная показательная

функция, протабулированная в математических справочниках.

Как показывает анализ соотношения (21), снижения остаточных напряжений в получаемых покрытиях за счет их релаксации можно добиться путем снижения скорости охлаждения или увеличения его времени. При этом следует руководствоваться соблюдением условия:

$$\tau_i < \tau_c, \quad (25)$$

где τ_c — теоретическая адгезионная прочность покрытий в отсутствии остаточных напряжений.

Из соотношений (19) и (21) можно получить:

$$\tau_i = 2^{-m} 3^{\frac{3-m}{2}} A_0 t'^b \left[(\alpha_d - \alpha_n) c \frac{A}{2} th \frac{A \cdot l}{4h_n} \right]^m \quad (26)$$

или

$$t' = \left\{ A_0^{-1} \tau_i 2^{m} 3^{\frac{3-m}{2}} \left[(\alpha_d - \alpha_n) c \frac{A}{2} th \frac{A \cdot l}{4h_n} \right]^{-m} \right\}^{\frac{1}{b}}. \quad (27)$$

При этом значение времени охлаждения (t) определяется из уравнения (24) с учетом (27), а темп охлаждения (c) вычисляется путем численного решения (26) с учетом (25) и является минимально возможным для интервала температур ΔT .

Отсюда ясно, что охлаждение с постоянным темпом по режиму (16) не может обеспечить оптимальное быстроедействие при соблюдении условия (25).

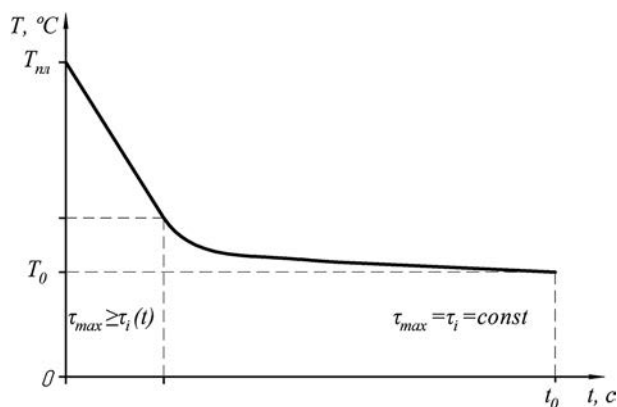


Рисунок 2 — Управление охлаждением детали в технологическом процессе индукционной центробежной наплавки с использованием двухступенчатого режима охлаждения

Figure 2 — Control of the cooling of the part in the technological process of induction centrifugal surfacing using a two-stage cooling mode

Для осуществления оптимального по быстродействию управления охлаждением заготовки в технологическом процессе индукционной центробежной наплавки можно предложить использование двухступенчатого режима (рисунок 2).

На первом этапе охлаждения управление осуществляется тривиально с максимально возможным темпом c_1 , который может обеспечить технологическое оборудование:

$$\Delta T = c_1 t. \quad (28)$$

В случае достижения температурных напряжений предельно допустимой величины τ_{\max} в качестве условия сопряжения для перехода из предыдущего этапа охлаждения на следующий служит равенство:

$$\tau_{\max} = t_i, \quad (29)$$

где t_i определяется из выражений (21) или (26).

На втором этапе охлаждение осуществляют с уменьшающейся скоростью, а темп охлаждения регулируется на основании формулы (26), где принимают $\tau_i = \tau_{\max} = \text{const}$.

Очевидно, что суммарное время двухступенчатого охлаждения будет меньше, чем у одноступенчатого, за счет более высокого темпа охлаждения на первом этапе.

Регулирование темпа охлаждения может осуществляться дополнительным подогревом заготовки либо уменьшением скорости ее вращения, что замедляет конвективный теплообмен на ее поверхности. Второй метод является предпочтительным, поскольку он более экономичен и технологически прост.

Использование разработанной методики двухступенчатого охлаждения заготовки для практического применения при нанесении покрытий центробежной индукционной наплавкой. В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси проведены экспериментальные



Рисунок 3 — Процесс изготовления биметаллической заготовки втулки подбивочного блока машины ВПР номенклатуры ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги»

Figure 3 — Process of manufacturing a bimetallic workpiece of the bushing of the tamping block of the STS track machine of the nomenclature of the Operational Republican Unitary Enterprise “Center of Trackwork Mechanization under the Belarussian Railway”



Рисунок 4 — Биметаллическая заготовка втулки № 90.31.00.062 подбивочного блока машины ВПР номенклатуры ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги» с покрытием из силумина АК12, подслоя — порошок свинца ПС1

Figure 4 — Bimetallic workpiece of the bushing no. 90.31.00.062 of the tamping block of the STS track machine of the nomenclature of the Operational Republican Unitary Enterprise “Center of Trackwork Mechanization under the Belarussian Railway” with a coating of silumin AK12, a sublayer — lead powder ПС1 (PS1)

исследования по практическому использованию двухступенчатого охлаждения изготовленных биметаллических втулок подбивочных блоков выправочно-подбивочно-рихтовочных (ВПР) машин номенклатуры ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги» (г. Пинск, Республика Беларусь) методом центробежной индукционной наплавки (рисунки 3–4).

Таблица — Состав покровного флюса (масс.%)
Table — Composition of the covering flux (wt.%)

KCl	NaCl	NaF	Na ₃ AlF ₆
10	50	30	10

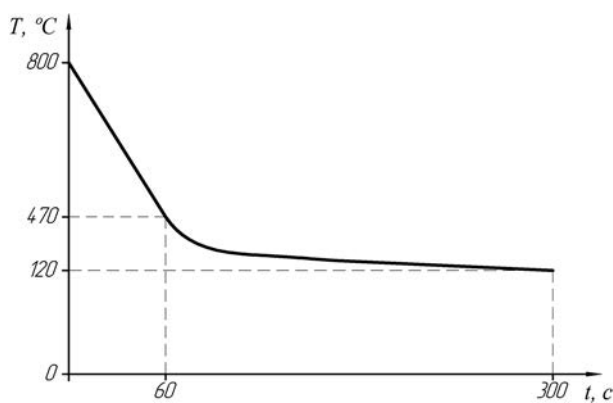


Рисунок 5 — Управление охлаждением биметаллической заготовки в технологическом процессе индукционной центробежной наплавки с использованием двухступенчатого режима при изготовлении биметаллических втулок подбивочных блоков путевой машины ВПР

Figure 5 — Control of cooling of a bimetallic workpiece in the technological process of induction centrifugal surfacing using a two-stage mode in the manufacture of bimetallic bushings of the tamping blocks of the STS track machine

Заготовки выполнялись в виде основы из стали 20 (ГОСТ 1050-2013), размеры которых составляли: наружный диаметр — 104 мм, внутренний диаметр — 85 мм, длина — 133 мм (из расчета получения двух деталей из одной заготовки). В качестве наносимого покрытия использовалась шихта, состоящая из силумина алюминий-кремниевый сплав АК12 (ГОСТ 1583-93). Для обеспечения адгезии наплавки из силумина со стальной основой в состав шихты вводился порошок свинца марки ПС1, а также покровной флюс (таблица) в количестве 5 % от массы наплавляемого сплава для удаления окислов и улучшения условий формирования покрытия [13–16].

Толщина наносимого слоя из сплава АК12 составляла 4–5 мм на сторону (с учетом припуска на механическую обработку). Толщина промежуточного свинцового слоя составляла 1,3–1,5 мм. Температуру нагрева заготовки контролировали с помощью системы управления технологическими режимами индукционной наплавки СУТРИН 2.4.09.000.

Результаты проведенных экспериментальных исследований по практическому использованию двухступенчатого охлаждения для релаксации остаточных напряжений позволяют рекомендовать (рисунок 5) следующие режимы для оптимального по быстродействию управления технологическими параметрами охлаждения при нанесении покрытий на биметаллические втулки подбивочных блоков путевых машин ВПР. А именно, на первом этапе охлаждение покрытия следует осуществлять с температуры плавления наносимой шихты до температуры 470 °C с темпом охлаждения 5,5 град/с. В дальнейшем темп охлаждения снижают до 1,2 град/с и заканчивают регулирование охлаждения при 120 °C. Это позволяет понизить уровень остаточных напряжений, за счет чего

повышаются прочностные и другие физико-механические свойства получаемых биметаллических изделий, а также их ресурс работы.

Заключение. В результате теоретического анализа процесса охлаждения деталей с наплавленными покрытиями, нанесенными методом центробежной индукционной наплавки, установлены закономерности формирования остаточных напряжений с учетом релаксации. Разработаны теоретические основы оптимального управления нестационарными температурными режимами получения композиционных порошковых покрытий центробежным индукционным методом при ограничениях на термоупругие напряжения. Показано, что оптимальное по быстродействию управление процессами формирования покрытий может быть достигнуто путем регулирования мощности нагрева либо скорости вращения заготовки. Выведены расчетные соотношения, позволяющие прогнозировать допустимую величину остаточных напряжений в зависимости от требуемой адгезионной прочности. Как показывает анализ полученных соотношений, снижения остаточных напряжений в получаемых покрытиях за счет их релаксации можно добиться путем уменьшения скорости охлаждения или увеличения его времени за счет явления релаксации. При этом следует руководствоваться соблюдением условия $\tau_i < \tau_c$, где τ_c — теоретическая адгезионная прочность покрытий в отсутствие остаточных напряжений.

Для осуществления оптимального по быстродействию управления охлаждением заготовки в технологическом процессе индукционной наплавки предложено использование двухступенчатого режима. На первом этапе охлаждения управление осуществляется тривиально с максимально возможным темпом c_1 , который может обеспечить технологическое оборудование. В случае достижения температурных напряжений предельно допустимой величины τ_{max} в качестве условия сопряжения для перехода из предыдущего этапа охлаждения на следующий служит равенство $\tau_{max} = \tau_i$, где τ_i определяется из выведенных в работе уравнений. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволили рекомендовать оптимальные режимы двухступенчатого охлаждения при нанесении антифрикционных покрытий на втулки подбивочных блоков машин ВПР номенклатуры ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги» методом центробежной индукционной наплавки из шихт, содержащих в своем составе сплав АК12, порошок свинца марки ПС1 и покровной флюс.

Использование двухступенчатого режима охлаждения позволяет понизить уровень остаточных напряжений, за счет чего повышаются прочностные и другие физико-механические свойства получаемых биметаллических изделий, а также их ресурс работы.

Список литературы

1. Белоцерковский, М.А. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения функциональных покрытий / М.А. Белоцерковский, И.А. Сосновский, А.А. Куриленок // Актуальные проблемы прочности / под ред. В.В. Рубаника. — Минск: ИВЦ Минфина, 2022. — Гл. 3. — С. 33–46.
2. Оптимизация процесса многослойной центробежной индукционной наплавки покрытий на основе алюминиевых сплавов / М.А. Белоцерковский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 2(55). — С. 35–41.
3. Технология нанесения покрытий на детали узлов трения путевых машин центробежным индукционным методом / К.Е. Белявин [и др.] // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология — Оборудование — Инструмент — Качество: тез. докл. междунар. науч.-технич. конф., Минск, 8 апр. 2021 г. / Бизнесофсет; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. — Минск, 2021. — С. 30–32.
4. Технологические схемы и универсальное оборудование для центробежного индукционного формирования порошковых покрытий / М.А. Белоцерковский [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения / Донецкий нац. техн. ун-т; редкол.: А.Н. Михайлов (гл. ред.) [и др.]. — Донецк, 2020. — Вып. 3(70). — С. 12–21.
5. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худoley // Вестн. ФФИ. — 2013. — № 3(65). — С. 70–87.
6. Кашицин, Л.П. Закономерности охлаждения детали с внутренним покрытием, полученным методом центробежного индукционного припекания / Л.П. Кашицин, А.И. Жорник, И.А. Кирпиченко // Вес. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. — 1995. — № 1. — С. 19–26.
7. Напряженное состояние цилиндрических деталей с внутренним покрытием, полученным методом центробежного припекания / Н.Н. Дорожкин [и др.] // Вестн. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. — 1990. — № 3. — С. 63–69.
8. Холистер, Г.С. Материалы, упрочненные волокнами / Г.С. Холистер, К. Томас; пер. с англ. Б.А. Клыпина; под ред. В.С. Ивановой. — М.: Металлургия, 1969. — 149 с.
9. Гафо, Ю.Н. Релаксация остаточных напряжений после нанесения порошковых покрытий / Ю.Н. Гафо, И.А. Сосновский, М.А. Белоцерковский // Вестн. Гродзенскага дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. — 2013. — № 1(145). — С. 64–68.
10. Теоретические аспекты процесса формирования контактной прочности между наносимым покрытием и основой / М.А. Белоцерковский [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. / Донецкий нац. техн. ун-т; редкол.: А.Н. Михайлов (гл. ред.) [и др.]. — Донецк, 2019. — Вып. 3(66). — С. 3–8.
11. Ильющин, А.А. Основы математической теории термовязкоупругости / А.А. Ильющин, Б.Е. Победря. — М.: Наука, 1970. — 280 с.
12. Май, В.К. Горячее прессование металлических порошков / В.К. Май, Э.Т. Денисенко // Порошковая металлургия. — 1968. — № 10. — С. 27–32.
13. Структура и триботехнические свойства алюминиевых покрытий, получаемых методом центробежной индукционной наплавки / К.Е. Белявин [и др.] // Перспективные материалы и технологии / под ред. В.В. Рубаника. — Минск: Изд. центр БГУ, 2021. — Гл. 11. — С. 140–155.
14. Способ нанесения двухслойного покрытия на внутреннюю поверхность детали: пат. ВУ 23365 / М.А. Белоцерковский, А.И. Комаров, И.А. Сосновский, Д.В. Орда, А.А. Куриленок, Д.О. Искандарова. — Оpubл. 30.04.2021.
15. Изучение влияния технологических режимов многослойной индукционной наплавки на структурообразование антифрикционных покрытий из сплава АК12 / М.А. Белоцерковский [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: В.Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2020. — Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. — С. 234–242.
16. Влияние флюсов на структуру покрытия из сплава АК12 с подслоем свинца, полученного на внутренней поверхности стальной заготовки / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Обедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2020. — Вып. 9. — С. 336–341.

SOSNOVSKY Igor A.

Senior Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: sos3@tut.by

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

KURILYONOK Artem A., Ph. D. in Eng.

Senior Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: AKTO13@mail.ru

KOMAROV Aleksandr I., Ph. D. in Eng.

Head of the Laboratory of Modification Techniques of Structural Materials of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: al_kom@tut.by

ORDA Dmitriy V.

Researcher of the Laboratory of Modification Techniques of Structural Materials of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: dmitry_orda@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 21 November 2022.

RELAXATION OF RESIDUAL STRESSES DURING COOLING OF A WORKPIECE WITH A COATING APPLIED BY CENTRIFUGAL INDUCTION SURFACING METHOD

As a result of a theoretical analysis of the cooling process of parts with deposited coatings applied by the method of centrifugal induction surfacing, the patterns of formation of residual stresses are established, taking into account relaxation. It is shown that a decrease in the cooling rate after surfacing makes it possible to reduce the level of residual stresses due to the relaxation phenomenon. Calculation relations are derived that allow predicting the permissible value of residual stresses depending on the required adhesive strength. As the analysis of the ratios obtained shows, the reduction of residual stresses in the resulting coatings due to their relaxation can be achieved by reducing the cooling rate or, accordingly, increasing its time. In the technological process of induction surfacing, a two-stage cooling mode of the workpiece was used; at the first stage, cooling is carried out at the maximum possible rate. If the temperature stresses reach the maximum allowable value τ_{max} , the pairing condition for the transition from the previous cooling stage to the next one is the equality $\tau_{max} = \tau_p$, where τ_i is determined from the equations derived in the work. In this case, one should be guided by the observance of the condition $\tau_i < \tau_c$, where τ_c is the theoretical adhesive strength of coatings in the absence of residual stresses. An example of the practical use of the two-stage cooling after the process of applying coatings by centrifugal induction surfacing on the bushings of tamping blocks of a STS track machine is given.

Keywords: coatings, residual stresses, relaxation, centrifugal induction surfacing, adhesion strength, bimetallic parts, tamping block bushings, STS track machine

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-55-62>

References

- Belotserkovsky M.A., Sosnovsky I.A., Kurilyonok A.A. Induktsionnyy nagrev v protsessakh tsentrobezhnogo nanoseniya funktsionalnykh pokrytiy [Induction heating in centrifugal functional coating processes]. *Aktualnye problemy prochnosti*, 2022, ch. 3, pp. 33–46 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Kurilyonok A.A., Belyavin K.E., Sosnovsky I.A. Optimizatsiya protsessa mnogosloynnoy tsentrobezhnoy induktsionnoy naplavki pokrytiy na osnove alyuminiyevykh splavov [Optimization of the process of multilayer centrifugal induction surfacing of coatings based on aluminum alloys]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 2(55), pp. 35–41 (in Russ.).
- Belyavin K.E., Belotserkovsky M.A., Sosnovsky I.A., Kurilyonok A.A. Tekhnologiya nanoseniya pokrytiy na detali uzlov treniya putevykh mashin tsentrobezhnym induktsionnym metodom [Technology of applying coatings on parts of friction units of track machines by centrifugal induction method]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Perspektivnye napravleniya razvitiya tekhnologii mashinostroeniya i metalloobrabotki. Tekhnologiya – Oborudovanie – Instrument – Kachestvo"* [Theses of the international scientific and technical conference "Promising areas of development of mechanical engineering and metalworking technology. Technology — Equipment — Tools — Quality"]. Minsk, 2021, pp. 30–32 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Belyavin K.E., Sosnovsky I.A., Kurilyonok A.A. Tekhnologicheskie skhemy i universalnoe oborudovanie dlya tsentrobezhnogo induktsionnogo formovaniya poroshkovykh pokrytiy [Technological scheme and design of universal equipment for centrifugal induction molding of powder coatings]. *Progressive technologies and systems of mechanical engineering*, 2020, iss. 3(70), pp. 12–21 (in Russ.).
- Belyavin K.E., Sosnovsky I.A., Khudoley A.L. Induktsionnyy nagrev v protsessakh tsentrobezhnogo nanoseniya pokrytiy [Induction heating in the process of centrifugal coating deposition]. *Vestnik of the foundation for fundamental research*, 2013, no. 3(36), pp. 70–87 (in Russ.).
- Kashitsin L.P., Zhornik A.I., Kirpichenko I.A. Zakonomernosti okhlazhdeniya detali s vnutrennim pokrytiem, poluchennym metodom tsentrobezhnogo induktsionnogo pripekaniya [Patterns of cooling of a part with an internal coating obtained by centrifugal induction sintering]. *Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series*, 1995, no. 1, pp. 19–26 (in Russ.).
- Dorozhkin N.N., Zhornik A.I., Kashitsin L.P., Kikhtenko S.N. Napryazhennoe sostoyanie tsilindricheskikh detaley s vnutrennim pokrytiem, poluchennym metodom tsentrobezhnogo pripekaniya [Stress state of cylindrical parts with an internal coating obtained by centrifugal sintering]. *Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series*, 1990, no. 3, pp. 63–69 (in Russ.).
- Holister G.S., Thomas C. *Fiber reinforced materials*. Amsterdam, London, New York, Elsevier Publishing Co. Ltd., 1966. 154 p.
- Gafo Yu.N., Sosnovsky I.A., Belotserkovsky M.A. K voprosu relaksatsii ostatochnykh napryazheniy posle nanoseniya poroshkovykh pokrytiy [On the issue of relaxation of residual stresses after the application of powder coatings]. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering science*, 2013, no. 1(145), pp. 64–68 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Sosnovsky I.A., Belyavin K.E., Kurilyonok A.A. Teoreticheskie aspekty protsessa formirovaniya kontaktnoy prochnosti mezhdru nanosimym pokrytiem i osnovoy [Theoretical aspects of the process of forming the contact strength between the applied coating and substrate]. *Progressive technologies and systems of mechanical engineering*, 2019, iss. 3(66), pp. 3–8 (in Russ.).
- Ilyushin A.A., Pobedya B.E. *Osnovy matematicheskoy teorii termoviskozoprugosti* [Fundamentals of the mathematical theory of thermoviscoelasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 280 p. (in Russ.).
- May V.K., Denisenko E.T. Goryachee pressovanie metallicheskikh poroshkov [Hot pressing of metal powders]. *Powder metallurgy*, 1968, no. 10, pp. 27–32 (in Russ.).
- Belyavin K.E., Komarov A.I., Sosnovsky I.A., Orda D.V. Struktura i tribotekhnicheskie svoystva alyuminiyevykh pokrytiy, poluchaemykh metodom tsentrobezhnoy induktsionnoy naplavki [Structure and tribotechnical properties of aluminum coatings obtained by centrifugal induction surfacing]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii*, 2021, ch. 11, pp. 140–155 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Komarov A.I., Sosnovsky I.A., Orda D.V., Kurilyonok A.A., Iskandarova D.O. *Sposob nanoseniya dvukhsloynnogo pokrytiya na vnutrennyuyu poverkhnost detali* [A method of applying a two-layer coating on the inner surface of the part]. Patent BY, no. 23365, 2021 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Komarov A.I., Sosnovsky I.A., Orda D.V., Kurilyonok A.A., Iskandarova D.O. Izuchenie vliyaniya tekhnologicheskikh rezhimov mnogosloynnoy induktsionnoy naplavki na strukturoobrazovanie antifriktsionnykh pokrytiy iz splava AK12 [Study of the influence of technological modes of multilayer induction surfacing on the structure formation of antifriction coatings made of AK12 alloy]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Kn. 2. Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki*, 2020, pp. 234–242 (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Komarov A.I., Sosnovsky I.A., Orda D.V., Kurilyonok A.A., Iskandarova D.O. Vliyanie flyusov na strukturu pokrytiya iz splava AK12 s podsloem svintsya, poluchennogo na vnutrenney poverkhnosti stalnoy zagotovki [Influence of fusing agents on structure of the coating made of AK12 (AlSi12) alloy with a lead sublayer obtained on the steel blank inner surface]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2020, iss. 9, pp. 336–341 (in Russ.).