

УДК 621.791.92:621.77.016

ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ПОКРЫТИЯ И ПОДЛОЖКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЯХ

© 2025 г. С. А. Невский^a, *, Л. П. Башенко^a, **, В. Е. Громов^a, ***, А. Д. Филяков^a,
Д. Д. Михайлов^a, А. С. Чапайкин^a, С. С. Миненко^a

^aСибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, 654007 Россия

*e-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru

**e-mail: luda.baschenko@gmail.com

***e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Поступила в редакцию 15.04.2024 г.

После доработки 28.05.2024 г.

Принята к публикации 28.05.2024 г.

Методами конечных элементов решена задача о влиянии морфологии поверхности раздела между покрытием из быстрорежущей стали Р2М9 и подложкой из конструкционной стали 30ХГСА на распределение термоупругих напряжений в покрытии. Решение проводили в два этапа. На первом этапе изучали поведение напряжений при охлаждении от температуры 1573 К до температуры 293 К. На втором этапе после охлаждения к поверхности покрытия прилагали статическую растягивающую нагрузку. Морфологию поверхности раздела определяли по данным растровой электронной микроскопии. Из них следует, что профиль границы раздела имеет криволинейный вид и в первом приближении может быть описан гармонической функцией. Показано, что на этапе охлаждения волнообразная граница раздела покрытия и подложки служит наиболее эффективным барьером для образования трещин, перераспределяя области опасных растягивающих в подложке. Приложение растягивающей статической нагрузки к покрытию после его охлаждения показало, что в случае плоской границы раздела (с прямолинейным профилем) при значении модуля упругости подложки E_c на порядок меньше модуля упругости покрытия E_s происходит отрыв покрытия от подложки. Пластическое течение протекает в основном в покрытии. Такую же ситуацию наблюдали и при криволинейном профиле границы с той лишь разницей, что она препятствует отрыву покрытия от подложки. Если $E_s = 10E_c$, то при прямолинейном профиле границы раздела пластическое течение происходит как в подложке, так и в покрытии, а при криволинейном профиле границы этот процесс протекает в основном в подложке.

Ключевые слова: покрытие из быстрорежущей стали, плазменная наплавка, граница раздела, термоупругие напряжения, метод конечных элементов.

DOI: 10.31857/S1028096025010164, EDN: AAADOC

ВВЕДЕНИЕ

В процессе механического воздействия различных материалов рабочая поверхность инструментов, таких как токарные и буровые резцы, сверла, метчики, прокатные валки, подвергается износу, обусловленному трением скольжения по обрабатываемому материалу. Это приводит к их преждевременному выходу из строя [1, 2]. Немаловажную роль в образовании микродефек-

тов, приводящих к износу, играет поверхность материала, так как на ней для их зарождения необходима меньшая энергия, чем в объеме материала [3]. В связи с этим проблема создания поверхностных слоев с высокими механическими и трибологическими свойствами является актуальной. Для ее решения с помощью различных видов термической обработки, наплавки создают градиент структуры, фазового состава, который

приводит к повышению твердости и износостойкости [4]. Так, например, для увеличения ресурса буровых резцов используют армирующие вставки из кубического нитрида бора [5], а для прокатных валков применяют плазменную наплавку быстрорежущих сталей и другие виды термической обработки [6, 7]. Наиболее привлекательными с точки зрения получения высоких механических показателей материалов за относительно короткое время являются электронно-пучковая [8, 9] и магнито-импульсная обработка [10, 11]. Высокие механические показатели поверхностных слоев металлических материалов при обработке низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком обусловлены формированием микро- и нанокристаллов за счет высокоскоростной кристаллизации [9]. При магнито-импульсной обработке происходит измельчение зерен структуры до размеров менее 100 мкм за счет нагрева отдельных участков кристаллитов до температуры выше температуры Кюри и последующей магнитострикции [12]. Несмотря на свои преимущества, указанные виды обработки обладают существенными недостатками, одним из которых является отслоение полученных покрытий от подложки. Причиной отслоения является нарушение сплошности структурно-неоднородного тела вследствие наличия зон растягивающих напряжений [13]. Как показано в работах [14–16], особую роль в адгезии покрытий играет геометрия поверхности раздела покрытия и подложки. Так, в [14] показано, что формирование игольчатого профиля границы раздела способствует диспергированию концентраторов напряжений и сохранению функциональности покрытия без формирования протяженных полос локализованной пластичности в подложке. Действительно, расчеты, проведенные в [15, 16] с помощью метода конечных элементов, показали, что игольчатая форма границы раздела покрытия и подложки тормозит процесс распространения продольной трещины в данном покрытии и тем самым предотвращает его отслоение при внешнем сжатии композита [15]. В [16] выявлен трехстадийный характер пластического течения материала вблизи границы раздела покрытия и подложки. На первой стадии происходит зарождение пластических сдвигов, а на второй стадии формируется четко выраженная система полос локализации пластической деформации под углом 45° к оси нагрузки. На третьей стадии происходит размытие полос сдвига и локализация пластической деформации вдоль криволинейной границы раздела покрытия и подложки. Это позволяет сделать вывод о том, что место возникновения максимальной концентрации напряжений меняется в процессе

деформации композиционного материала. В этих работах исследовали поведение материалов покрытия и подложки в изотермических условиях. Поведение слоистых композитов с учетом термоупругих эффектов изучено в [17–19]. В [17] разработана аналитико-численная модель для прогнозирования воздействия динамической термомеханической нагрузки на многослойные металлические композитные панели. Показано, что в условиях комбинированной механической и тепловой нагрузки проявляются нелинейные эффекты в распределении температуры и напряжений в образцах. В [18] создана модель термоупругости с конечным числом элементов ортотропных композитных слоистых материалов, которые подвергали циклическому нагружению. Она позволила получить зависимость термоупругого отклика от частоты нагружения, наличия поверхностного слоя. В [19] разработана нелокальная модель для стационарного термоупругого анализа функционально-градиентных материалов и показаны особенности распределения напряжений и деформации в них.

Также следует отметить, что немаловажной для поиска оптимальных режимов формирования покрытия является информация о механизмах формирования границ раздела покрытия и подложки в зависимости от видов обработки [20–22]. В этих работах показано, что морфология поверхностей обусловлена протеканием различного рода гидродинамических неустойчивостей. Так, например, в [20] установлено, что зубчатый профиль границы раздела между материалом покрытия и подложки при электровзрывной обработке обусловлен протеканием комбинированной неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и Рэлея–Тейлора. Такой же механизм выявлен в работе [21] при исследовании сварки взрывом. В [22] установлено, что в процессе трения формирование криволинейного профиля границы раздела обусловлено развитием динамической неустойчивости.

Таким образом, для выбора режимов обработки покрытий концентрированными потоками энергии (плазменная наплавка, электронно-пучковая обработка, магнито-импульсная обработка), которые обеспечивают оптимальную геометрию поверхности раздела, и, соответственно, необходимо проведение расчетов термоупругих напряжений на границе раздела покрытия и подложки, что является целью работы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлено полученное методом электронной микроскопии изображение гра-

ницы раздела между наплавленным покрытием из быстрорежущей стали Р2М9 и подложкой из стали 30ХГСА. Из данного рисунка следует, что ее профиль может быть представлен в виде синусоиды со средним периодом ~ 37 мкм и амплитудой ~ 30 мкм. Изображение расчетной области с учетом данной морфологии границы раздела приведено на рис. 2. Для каждого из слоев (подложки и покрытия) записывались уравнения термоупругости и теплопроводности

$$\rho_n \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j};$$

$$c_{pn} \rho_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \nabla (k_n \nabla T_n) + (3\lambda_n + 2\mu_n) \alpha_{Tn} T_{0n} \frac{\partial \theta}{\partial t};$$

$$\sigma_{ij}^n = \lambda_n \theta_n \delta_{ij} + 2\mu_n \epsilon_{ij}^n - (3\lambda_n + 2\mu_n) \alpha_{Tn} (T_n - T_{0n}), \quad (1)$$

где u_n — вектор перемещения; σ_{ij}^n — компоненты тензора напряжений; c_{pn} — теплоемкость; ρ_n — плотность; T_n — температура; T_{0n} — начальная температура; λ_n и μ_n — коэффициенты Ламе; α_{Tn} —

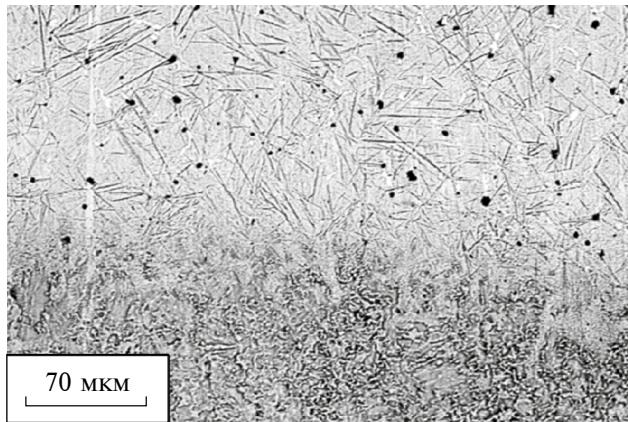


Рис. 1. Изображение границы раздела наплавленного покрытия и подложки, полученное методом растровой электронной микроскопии.

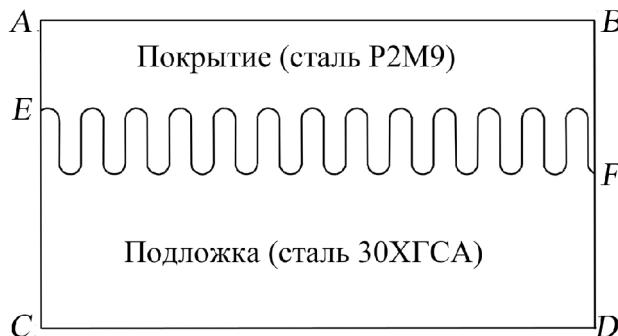


Рис. 2. Схема области раздела покрытия и подложки, в которой выполнены расчеты.

коэффициент линейного расширения; θ_n — объемная деформация; k_n — теплопроводность, n — номер слоя; δ_{ij} — символ Кронекера; $\epsilon_{ij}^n = 1/2(\frac{\partial u_{ni}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{nj}}{\partial x_i})$ — тензор деформации; $\theta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}$; t — время.

Граничные условия для системы уравнений теории термоупругости и теплопроводности (1) приведены в табл. 1. Тепловые потоки $P_1(T)$ и $P_2(T)$ определяли из результатов моделирования распределения температуры в наплавленном покрытии и подложке во всем объеме образца методом конечных элементов [23] путем применения функции Total Heat Source в Comsol Multiphysics.

В качестве критерия перехода в область пластических деформаций использовали критерий Мизеса:

$$((\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\tau_{xy})^{1/2} \leq \sigma_y, \quad (2)$$

где σ_{xx} и σ_{yy} — нормальные компоненты тензора напряжений; τ_{xy} — касательная компонента; σ_y — предел текучести. В табл. 2 приведены характеристики материала покрытия и подложки. Зависимости теплоемкости, теплопроводности и модуля упругости I рода от температуры получали путем аппроксимации соответствующих справочных данных [24, 25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе изучали поведение напряжений при охлаждении от температуры 1573 К до температуры 293 К. На рис. 3 продемонстрировано распределение нормальной компоненты тензора напряжений σ_{xx} на границе раздела наплавленного покрытия и подложки. Из данного рисунка следует, что в начальный момент времени в покрытии преобладают растягивающие напряжения, значения которых составляют $\sigma_{xx} \sim +2100$ МПа, тогда как в подложке наоборот имеют место сжимающие напряжения $\sigma_{xx} \sim -13900$ МПа (рис 3а). По мере приближения к границе раздела происходит увеличение этих напряжений, а наибольшие значения напряжения наблюдали в области максимумов профиля границы раздела покрытие–подложка. Их максимальные значения составляют $\sigma_{xx} +7430$ МПа в покрытии и $\sigma_{xx} -16580$ МПа в подложке. Области растягивающих и сжимающих напряжений на этой границе располагаются в шахматном порядке, что не противоречит общепринятым представлениям физической мезомеханики [13–15]. После охлаждения в течение 100 с (рис. 3б) происходит снижение напряжений и уменьшение размера областей растягивающих напряжений. Максималь-

Табл. 1. Границные условия для системы уравнений (1)

Граница (согласно рис. 2)	T, q	σ, \mathbf{u}
AB	$-\mathbf{n}\mathbf{q} = P_1(T)$	$\mathbf{u} = 0$
CD	$-\mathbf{n}\mathbf{q} = P_2(T)$	$\mathbf{u} = 0$
AE, BF	$-\mathbf{n}\mathbf{q} = P_1(T)$	$\mathbf{u} = 0$
EC, FD	$-\mathbf{n}\mathbf{q} = P_2(T)$	$\mathbf{u} = 0$

Табл. 2. Физические свойства материала покрытия и подложки

Величина	Подложка	Покрытие
	Сталь 30ХГСА	Сталь Р2М9
Плотность ρ , кг/м ³	7850	8800
Модуль Юнга E , ГПа	215	181
Коэффициент линейного расширения α_T , 10^{-6} К ⁻¹	117	1.1
Удельная теплоемкость c_p , Дж/(кг·К)	496	500
Теплопроводность k , Вт/(м·К)	38	27
Коэффициент Пуассона ν	0.28	0.28
Начальная температура образца T_0 , К	293	1573

ные значения нормальной компоненты тензора напряжений на границе раздела в этот момент времени составляет $\sigma_{xx} \sim +278.5$ МПа и -334 МПа. При $t > 200$ с наблюдается полное охлаждение покрытия и подложки, и можно наблюдать сжимающие напряжения с максимальным значением -3.312 МПа, а в подложке — растягивающие напряжения, максимальное значение которых составляет $\sigma_{xx} \sim 3.158$ МПа. По мере удаления от границы раздела в покрытии происходит снижение напряжения до -0.07 МПа, а в подложке растягивающие напряжения увеличиваются до 477 МПа.

На втором этапе после охлаждения к поверхности покрытия прилагали статическую растягивающую нагрузку. Распределение сдвиговых напряжений τ_{xy} представлено на рис. 4. Так же как в предыдущем случае, области положительных и отрицательных сдвиговых напряжений на границе раздела покрытия и подложки располагаются в шахматном порядке. До охлаждения в покрытии максимальное значение положительных сдвиговых напряжений в покрытии составляет $+12240$ МПа, а отрицательных напряжений ~ -9750 МПа. В подложке значения этих напряжений составляют $\sim +3080$ и -4250 МПа. При $t = 100$ с максимальные значения напряжений в покрытии составляют $+225$ и -216.5 МПа

соответственно; в подложке значение $\tau_{xy(max)} \sim +176.8$ и 187.4 МПа. При $t > 200$ с в покрытии присутствуют положительные сдвиговые напряжения с максимальным значением 2.477 МПа и отрицательные с максимальным значением -3.369 МПа. Следует отметить, что области концентрации сдвиговых и нормальных напряжений остаются на своих местах за все время охлаждения, только их амплитуда уменьшается.

Расчет напряжений по Мизесу показал, что до охлаждения образца их максимальное значение вблизи границы раздела покрытие—подложка составляет 9270 МПа в покрытии и 20860 МПа в подложке (рис. 5а). В момент окончания охлаждения эти значения составляют 2.594 и 5.738 МПа соответственно (рис. 5б), что много меньше предела текучести стали Р2М9 (630 МПа). Таким образом, можно сделать вывод о том, что волнообразная граница раздела препятствует развитию трещин в покрытии при охлаждении путем диспергирования концентраторов напряжений.

На рис. 6 продемонстрировано поведение системы “покрытие/подложка” с плоской и волнообразной границей раздела после охлаждения в условиях растягивающей нагрузки при различных соотношениях их модулей упругости $B = E_c/E_s$, где E_c — модуль упругости покрытия; E_s — модуль

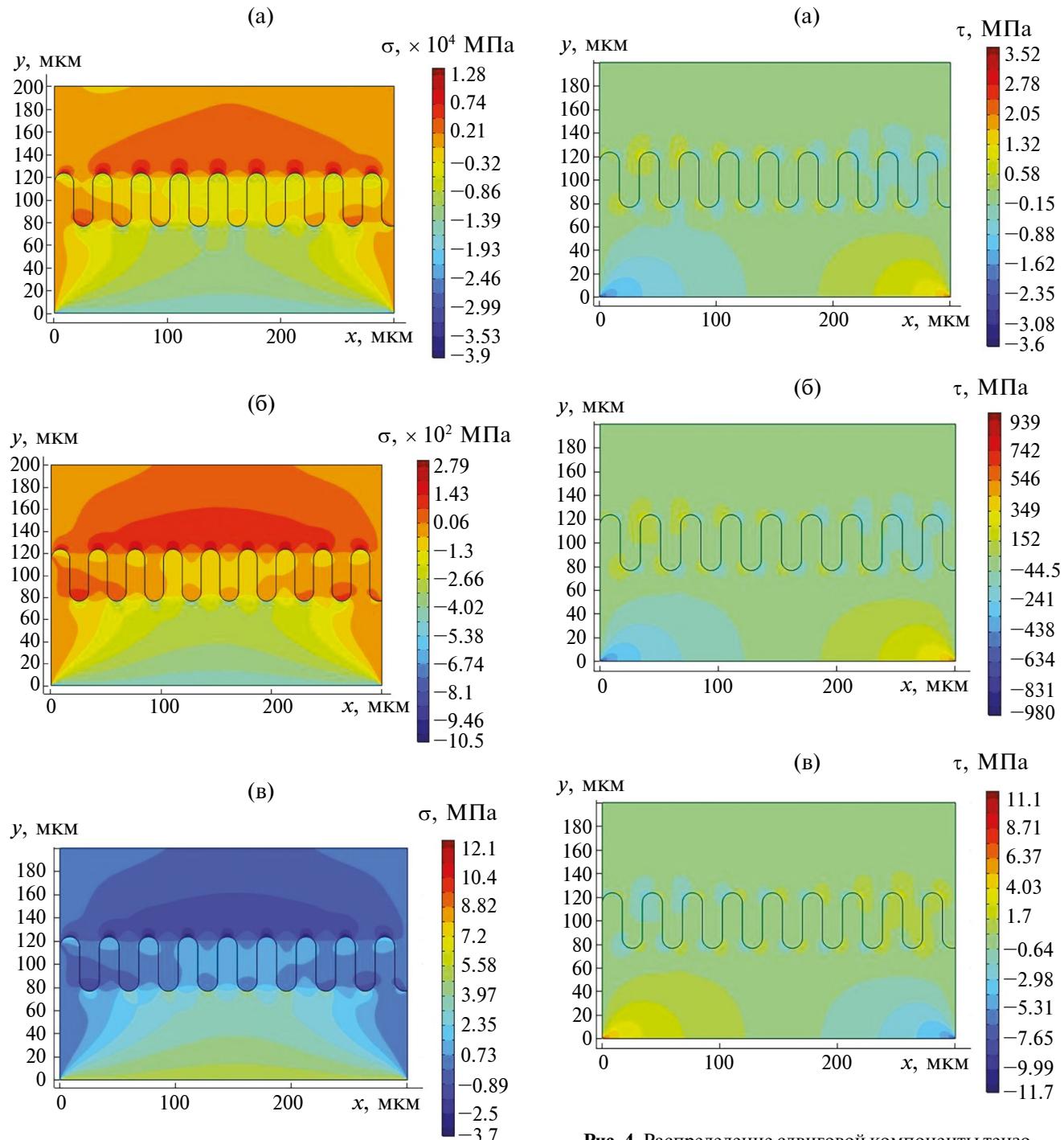


Рис. 3. Распределение нормальной компоненты тензора напряжений σ_{xx} на поверхности раздела покрытия и подложки после 0 (а), 100 (б) и 200 с (в) охлаждения образца.

упругости подложки. Из данного рисунка следует, что при $B = 0.1$ в случае плоской границы раздела происходит отрыв покрытия от подложки при малых значениях растягивающего усилия ~ 100 Н/м² (рис. 6а), тогда как в случае волнообразной

границы отрыв покрытия от подложки не наступает даже при значении внешнего напряжения, равного пределу текучести покрытия (рис. 6б). Чтобы отрыв произошел, необходимы значения внешнего растягивающего напряжения в 2–3 раза

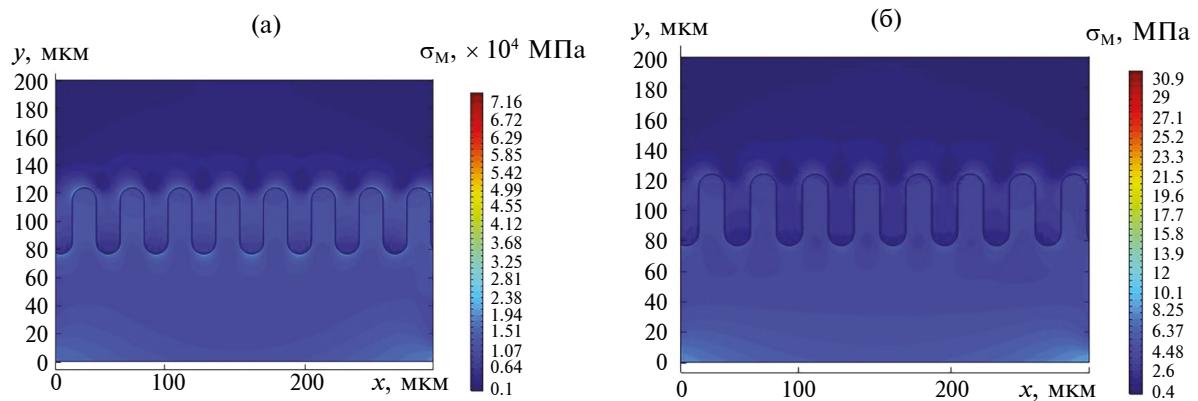


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу на поверхности раздела покрытия и подложки после 0 (а) и 200 с (б) охлаждения образца.

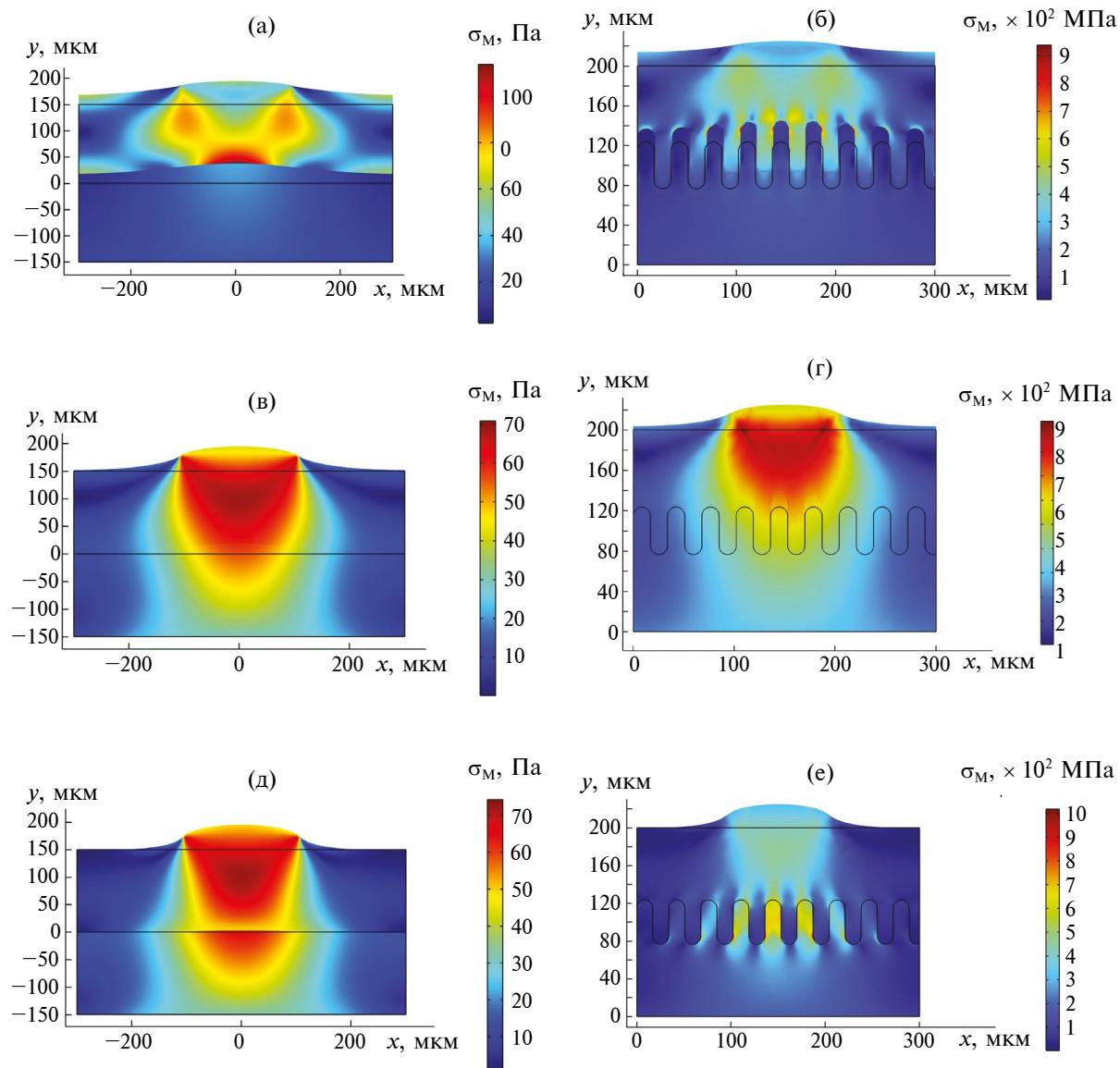


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу на поверхности раздела покрытия и подложки после окончания охлаждения и приложения растягивающей нагрузки с соотношением модулей упругости: а) — $B = 0.1$ (а, б); 0.94 (в, г); 10 (д, е) в случае плоской (а, в, д) и волнообразной (б, г, е) границы раздела покрытие—подложка.

больше предела текучести. Напряжения Мизеса в этом случае в основном сосредоточены в покрытии и составляют ~ 900 МПа на границе покрытия и подложки, что позволяет сделать вывод о том, что при мягкой подложке (соотношение модулей упругости ~ 0.1) пластическая деформация будет протекать в покрытии. При возрастании значения B до 0.94, которое соответствует быстрорежущей стали, картина распределения напряжения Мизеса существенно изменяется (рис. 6в, 6г). Отрыва покрытия от подложки не происходит, как в случае плоской поверхности раздела покрытие–подложка и малых растягивающих нагрузок (рис. 6в), так и в случае волнообразной границы раздела и значении внешнего напряжения, равного пределу текучести покрытия (рис. 6г). Максимальное значение напряжения Мизеса вблизи криволинейной границы в покрытии составляет 353 МПа, что ~ 1.3 раза ниже предела текучести.

Если модуль упругости подложки будет на порядок выше модуля упругости покрытия, то для плоской границы раздела пластические области будут наблюдаться как в покрытии, так и в подложке (рис. 6д), тогда как при криволинейной границе наибольшие значения напряжений Мизеса будут наблюдаться только в подложке.

Таким образом, необходимо подбирать такие режимы наплавки быстрорежущих сталей, которые обеспечивают формирование криволинейных поверхностей раздела, профиль которых может быть описан гармоническими функциями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью метода конечных элементов получены распределения нормальных и сдвиговых компонент тензора термоупругих напряжений и интенсивности напряжений по Мизесу на границе раздела покрытия из быстрорежущей стали Р2М9 на подложке из стали 30ХГСА.

Установлено, что на стадии самопроизвольного охлаждения от температуры 1573 К до температуры 293 К на криволинейной границе раздела происходит перераспределение растягивающих и сжимающих напряжений, а также напряжений Мизеса. Значения этих напряжений, а также размеры областей концентрации напряжений по мере охлаждения уменьшаются, что способствует предотвращению развития трещин в покрытии из быстрорежущей стали на данном этапе.

Приложение растягивающей нагрузки к покрытию после процесса охлаждения показало, что при соотношении модулей упругости покрытия и подложки $B = 0.1$ покрытие отрывается

от подложки, если граница раздела плоская. В случае волнообразной границы раздела для отрыва необходимо приложить внешнее напряжение в 2–3 раза больше предела текучести быстрорежущей стали. При $B = 0.94$ и 10 пластическое течение происходит как в покрытии, так и в подложке. Однако в случае криволинейной границы раздела покрытие–подложка и значение $B = 10$ пластическая деформация локализована в подложке, о чем свидетельствуют более высокие напряжения Мизеса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мозговой И.В., Шнейдер Е.А. Наплавка быстрорежущей стали. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 200 с.
2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. М.: Машиностроение, 2008. 406 с.
3. Maruschak P.O., Panin S.V., Ignatovich S.R., Zakiev I.M., Konovalenko I.V., Lytvynenko I.V., Sergeev V.P. // Theor. Appl. Fracture Mech. 2019. V. 57. P. 43. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2011.12.007>
4. Wang Y., Mao B., Chu Sh., Chen S., Xing H., Zhao H., Wang Sh., Wang Y., Zhang J., Sun B. // J. Mater. Res. Technol. 2023. V. 24. P. 8198. <https://www.doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.269>
5. Корнеев В.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 11. Вып. 1. С. 116. https://www.doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_116
6. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Осечковский В.Л., Бащенко Л.П. // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 10 (742). С. 106.
7. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Будовских Е.А., Chen X. // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 9. С. 707.
8. Lu J., Song Zh., Qin H., Huang H., Sui X., Weng Y., Mo Zh., Wang K., Ren X. // Vacuum. 2023. V. 218. P. 112634.
9. Shulov V.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engel'ko V.I. // Russ. J. Non-Ferrous Metals. 2016. V. 57. P. 256.
10. Yang Y., Yang Y., Liao Ch., Yang G., Qin Y., Li Q., Wu M. // Tribology Int. 2021. V. 161. P. 107086. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107086>
11. Алифанов А.В., Попова Ж.А. // Литье и металлургия. 2012. № 4 (68). С. 151.

12. Алифанов А.В., Ционенко Д.А., Милюкова А.М., Ционенко Н.М. // Proc. National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series. 2016. № 4. Р. 31.
13. Люкин П.А., Люкин Б.А., Матолыгина Н.Ю., Панин С.В. // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 5. С. 69.
14. Панин С.В., Коваль А.В., Трусова Г.В., Почивалов Ю.И., Сизова О.В. // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. № 2. С. 99.
15. Балохонов Р.Р., Романова В.А. // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 5. С. 12.
16. Балохонов Р.Р., Романова В.А. // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 1. С. 75.
17. Ganilova O.A., Cartmell M.P., Kiley A. // Composite Structures. 2022. V. 288. P. 115423.
18. Cappello R., Pitarresi G., Catalanotti G. // Composites Sci. Technol. 2023. V. 241. P. 110103.
19. Li Zh., Huang D., Xu Y., Yan K. // Appl. Math. Modelling. 2021. V. 93. P. 294.
20. Nevskii S., Sarychev V., Konovalov S., Granovskii A., Gromov V. // J. Mater. Res. Technol. 2020. № 9 (1). P. 539.
21. Sun Y., Gou J., Wang Ch., Zhou Q., Liu R., Chen P., Yang T., Zhao X. // Defence Technology. 2024. V. 32. P. 521.
22. Brener E.A., Weikamp M., Spatschek R., Bar-Sinai Y., Bouchbinder E. // J. Mech. Phys. Solids. 2016. V. 89. P. 149.
23. Невский С.А., Бащенко Л.П., Громов В.Е., Филиков А.Д. // Деформация и разрушение материалов. 2024. № 6. С. 2.
24. Таблицы физических величин. Справочник. / Ред. Кикоин И.К. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
25. Марочник сталей и сплавов. / Ред. Зубченко А.С. М.: Машиностроение, 2003. 782 с.

Influence of the Morphology of the Interface Between the Coating and the Substrate on the Distribution of Thermoelastic Stresses in High-Speed Steels

S. A. Nevskii^{1,*}, L. P. Baschenko¹, V. E. Gromov¹, A. D. Filyakov¹, D. D. Mikhailov¹,
A. S. Chapaikin¹, S. S. Minenko¹

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007 Russia

*e-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru

Finite element methods have solved the problem of the influence of the morphology of the interface between coating made of high-speed steel P2M9 and substrate made of structural steel 30HGSA on the distribution of thermoelastic stresses in the coating. It was solved in two stages. At the first stage, the behavior of stresses during cooling from a temperature of 1573 K to a temperature of 293 K. was studied. At the second stage, after cooling, a static tensile load was applied to the coating surface. The morphology of the interface was determined using scanning electron microscopy data. It follows from them that the interface has a curved appearance and, in the first approximation, can be described by a harmonic function. It is shown that at the cooling stage, the undulating interface between the coating and the substrate serves as the most effective barrier to crack formation, redistributing the areas of dangerous tensile forces into the substrate. The application of a tensile static load to the coating after cooling has shown that in the case of a rectilinear interface, when the value of the elastic modulus of the substrate (E_c) is an order of magnitude less than the elastic modulus of the coating (E_s), the coating separation from the substrate is observed. The plastic flow occurs mainly in the coating. The same situation is observed for a curved boundary with the only difference that it prevents separation. If $E_s = 10E_c$, then for a rectilinear boundary, plastic flow is observed both in the substrate and in the coating, and for a curved boundary, this process occurs mainly in the substrate.

Keywords: high-speed steel coating, plasma surfacing, interface, thermoelastic stresses, finite element method.