

**СЕКЦИЯ 1**  
**ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ**  
**И ПЛАЗМЫ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ**

**SECTION 1**  
**PROCESSES OF RADIATION**  
**AND PLASMA INTERACTION WITH SOLIDS**

**ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО**  
**СОСТОЯНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКОЙ**  
**ПОКРЫТИЙ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ**

Л.П. Башенко, С.А. Невский

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
ул. Кирова 42, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк 654007, Россия,  
Luda.baschenko@gmail.com, nevskiy\_sa@physics.sibsiu.ru*

Методами конечных элементов решена задача о распределении напряжений в зоне контакта покрытия из стали Р2М9, полученного электродуговой наплавкой, с подложкой из конструкционной стали 30ХГСА. На первой стадии решалась задача о распределении напряжений при охлаждении от 1573 до 293 К, на втором этапе – после завершения охлаждения, когда к поверхности покрытия приложена статическая растягивающая нагрузка. Морфология границы раздела определена сканирующей электронной микроскопией: граница раздела криволинейной формы в первом приближении может быть описана гармонической функцией. На стадии охлаждения волнообразная граница между покрытием и подложкой является наиболее эффективным барьером для предотвращения образования трещин, перераспределяя зоны опасных растягивающих напряжений в подложке. Приложение растягивающей статической нагрузки к покрытию после его охлаждения показало, что при значении модуля упругости подложки на порядок меньше, чем покрытия, пластическое течение протекает в основном в покрытии, тогда как при соотношении модулей упругости 0,94 материал покрытия находится в области упругих деформаций. Если модуль упругости подложки на порядок выше модуля упругости покрытия, то пластическое течение материала возможно только в подложке.

**Ключевые слова:** электродуговая наплавка; конструкционная сталь; распределение напряжений; границы раздела; образование трещин; модуль упругости.

**STRESS-STRAIN STATE OF PLASMA-DEPOSITED COATINGS**  
**MADE OF HIGH-SPEED STEELS**

L.P. Bashchenko, S.A. Nevsky

*Siberian State Industrial University*

*42 Kirova Str., 654007 Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, Russia,  
Luda.baschenko@gmail.com, nevskiy\_sa@physics.sibsiu.ru*

Finite element methods have solved the problem of stress distribution in the contact zone of a coating made of P2M9 steel obtained by electric arc welding with a substrate made of 30KHGSA structural steel. At the first stage, the problem of stress distribution during cooling from 1573 to 293 K was solved, at the second stage – after cooling was completed, when a static tensile load was applied to the coating surface. The morphology of the interface is determined by scanning electron microscopy: the interface has a curved shape and, to a first approximation, can be described by a harmonic function. At the cooling stage, the undulating boundary between the coating and the substrate is the most effective barrier to prevent cracking by redistributing the zones of dangerous tensile stresses in the substrate. The application of a tensile static load to the coating after its cooling showed that when the modulus of elasticity of the substrate is an order of magnitude lower than the coating, plastic flow occurs mainly in the coating,

whereas with a modulus of elasticity of 0.94, the coating material is in the region of elastic deformations. If the modulus of elasticity of the substrate is an order of magnitude higher than the modulus of elasticity of the coating, then plastic flow of the material is possible only in the substrate.

**Keywords:** electric ARC welding; structural steel; stress distribution; interface; crack formation; modulus of elasticity.

## 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]. Немаловажную роль в образовании микроструктурных дефектов, приводящих к износу, играет поверхность материала, так как на поверхности для их зарождения необходима меньшая энергия, чем в объеме материала [2]. В связи с этим проблема создания поверхностных слоев с высокими механическими и трибологическими свойствами является актуальной. В настоящее время для решения этой задачи все большее распространение находят способы наплавки износостойких покрытий из быстрорежущих сталей концентрированными потоками энергии, к числу которых относятся лазерная наплавка, электронно-лучевая и плазменная [3] наплавка и другие способы обработки. В процессе лазерной наплавки весьма велика вероятность образования горячих трещин, несмотря на образование микро- и наноструктуры и высокую скорость кристаллизации. Одно из требований проведения электронно-лучевой наплавки – создание высокого вакуума, что сильно ограничивает применение этого метода для крупногабаритных деталей, хотя в настоящее время развиваются и вневакуумные технологии [4]. С другой стороны, возможности плазменного способа не ограничены размерами и формой изделий. Недостатком этого способа является образование холодных трещин, для борьбы с которыми применяют дополнительные термические обработки.

В этой связи необходимо проведение поиска режимов плазменной наплавки

высокоуглеродистых быстрорежущих сталей, которые позволяют избежать образования холодных трещин и сохранить высокие механические и трибологические свойства покрытий без применения дополнительных термических обработок [5].

Решение этой задачи требует наличия знаний не только механизмов формирования микро- и наноструктур при наплавке, но и знания распределения механических напряжений в покрытии и на границе его раздела с подложкой в различные моменты времени после окончания воздействия плазмы. Особую роль в устойчивости покрытия и препятствовании его отслоению имеет геометрия его границы раздела с подложкой.

## Результаты и их обсуждение

В начальный момент времени в покрытии преобладают растягивающие напряжения, значения которых составляют примерно +2100 МПа, тогда как в подложке имеют место сжимающие напряжения величиной примерно -13900 МПа. По мере приближения к границе раздела происходит увеличение этих напряжений, при этом наибольшие значения наблюдаются на «горбах» волнообразной границы раздела. Их максимальные значения составляют примерно +7430 и -16580 МПа в покрытии и в подложке соответственно. Области растягивающих и сжимающих напряжений на этой границе располагаются в шахматном порядке, что не противоречит классическим представлениям физической мезомеханики. По мере охлаждения в момент времени 100 с происходит снижение напряжений и уменьшение размеров областей растягивающих напряжений. Максимальные значения на границе раздела в этот момент времени составляют +278.5 и -334 МПа.

При  $t > 200$  с наблюдается полное охлаждение покрытия и подложки. В покрытии наблюдаются сжимающие напряжения, их максимальное значение – 3.312 МПа, а в подложке – растягивающие напряжения, максимальное значение которых составляет +3.158 МПа. При удалении от границы раздела в покрытии наблюдается снижение напряжения до -0.07 МПа, а в подложке растягивающие напряжения увеличиваются до +477 МПа.

Области положительных и отрицательных сдвиговых напряжений на границе раздела покрытия и подложки располагаются в шахматном порядке. В момент времени 0 с в покрытии максимальное значение положительных сдвиговых напряжений в покрытии составляет +12240 МПа, а отрицательных напряжений – -9750 МПа. В подложке значения этих напряжений составляют приблизительно +3080 и -4250 МПа. В момент времени 100 с максимальные значения напряжений в покрытии составляют +225 и -216.5 МПа соответственно. В подложке значения  $\tau_{xy(max)}$  составляют +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, уменьшаются только их размеры [6].

## Заключение

На стадии самопроизвольного охлаждения от температуры 1573 К до температуры 293 К на криволинейной границе раздела покрытия и подложки происходит перераспределение растягивающих и сжимающих напряжений, а также напряжений Мизеса. Значения этих напряжений, а также размеры областей концен-

трации напряжений по мере охлаждения уменьшаются, что способствует предотвращению развития трещин в покрытии из быстрорежущей стали на этом этапе.

Приложение растягивающей нагрузки к покрытию после процесса охлаждения показало, что при соотношении модулей упругостей первого рода  $B = 0.1$  для отрыва покрытия необходимо приложить внешнее напряжение в 2 – 3 раза больше предела текучести быстрорежущей стали. При  $B = 0.94$  материал покрытия находится в области упругих деформаций. При увеличении  $B$  до 10 пластическая деформация локализована в подложке, о чем свидетельствуют более высокие напряжения Мизеса  $\sim 700$  МПа.

## Библиографические ссылки

1. Мозговой И.В., Шнейдер Е.А. Наплавка быстрорежущей стали. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 200 с.
2. Maruschak P.O., Panin S.V., Ignatovich S.R., Zakiev I.M., Konovalenko I.V., Lytvynenko I.V. et al. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2012; 57: 43-48.
3. Li Ye, Wang Y., Niu J., Liu S., Lin Y., Liu N., Ma J., Zhang Z., Wang J. Microstructure and mechanical properties of M2 high speed steel produced by electron beam melting. *Materials Science and Engineering: A* 2023; 862: 144327.
4. Mul D.O., Bushueva E.G., Lazurenko D.V., Lozhkina E.A., Domarov E.V. Structure and tribological properties of “carbon steel – VC containing coating” compositions formed by non-vacuum electron-beam surfacing of vanadium-containing powder mixtures. *Surface and Coatings Technology* 2023; 474: 130107.
5. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Осетковский В.Л., Бащенко Л.П. Структурно-фазовое состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной наплавкой в среде азота и высокотемпературным отпускком. *Известия вузов. Физика* 2019; 62: 10 (742): 106-111.
6. Невский С.А., Бащенко Л.П., Громов В.Е., Филяков А.Д. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя быстрорежущей стали при плазменной наплавке. *Деформация и разрушение материалов* 2024; 6: 2-10.