

### Выводы

1. Полировка поверхности спиц аппарата чрескостного остеосинтеза с помощью импульсного электронного пучка субмиллисекундной длительности обеспечивает достоверное снижение травмирующего воздействия спиц на костные структуры на протяжении иммобилизации, что является условием профилактики спицевого остеомиелита.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли А.Д., Баширов Р.С. Руководство по чрескостному компрессионно-дистракционному остеосинтезу. – Томск: Изд-во «Красное Знамя», 2002. – 307 с.
2. Соломин Л.Н. Основы чрескостного остеосинтеза аппаратом Г.А. Илизарова. – СПб.: ООО «МОРСАР АВ», 2005. – 544 с.
3. Ilizarov G.A. Transosseous Osteosynthesis: Theoretical and Clinical Aspects of the Regeneration and Growth of Tissue. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. – 800 p.
4. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devjatkov V.N., Sochugov N.S., et al. Automated power complex for pulse surface treatment of materials by electron beam // Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2006. – P. 79–85.

2. Применение спиц с заточкой в виде сверла по сравнению с традиционной трёхгранной формой обеспечивает быстрое их проведение через кости, существенное снижение нагрева и обеспечивает оптимальную конгруэнтность спицевого канала и самой спицы, что является залогом качества иммобилизации и профилактики гнойных хирургических осложнений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ № 08–08–92207 и № 09–02–90456.*

5. Ivanov Yu.F., Kolubaeva Yu.A., Teresov A.D., Koval N.N., et al. Electron beam nanostructuring of titanium alloys surface // Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2008. – P. 143–146.
6. Grigoriev S.V., Devjatkov V.N., Koval N.N., Teresov A.D. The Automated installation for surface modification of metal and ceramic-metal materials and products by intensive pulse sub-millisecond electron beam // Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2008. – P. 19–22.
7. Спица для остеосинтеза: пат. на ПМ 59394 Рос. Федерация. № 2006128758/22; заявл. 07.08.2006; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36. – 3 с.

*Поступила 06.09.2010 г.*

УДК 621.793.7

## РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ, СОЗДАВАЕМОГО УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ НАПЫЛЕННОГО МАТЕРИАЛА

Ж.Г. Ковалевская, А.П. Жуков\*, В.А. Клименов, В.Г. Бутов, К.В. Зайцев\*\*

Томский политехнический университет

\*НИИ прикладной механики и математики Томского государственного университета

\*\*Юргинский технологический институт ТПУ

E-mail: kovalevskaia@ispms.tsc.ru

*Численно рассмотрен процесс затвердевания газотермически напыленного материала на подложке из стали. Учтено изменение микрорельефа поверхности, создаваемое ультразвуковой обработкой. Использовалось решение нестационарного уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода расплав – твердый материал. Для численного решения применялся метод конечных элементов. Получены зависимости термического цикла температуры и скорости охлаждения от времени. Показано, что условия охлаждения напыляемого материала зависят от высоты и частоты расположения микронеровностей.*

### Ключевые слова:

*Газотермическое напыление, ультразвуковая финишная обработка, микрорельеф поверхности, метод конечных элементов, термические циклы.*

### Key words:

*Gas-thermal spraying, ultrasonic finishing treatment, surface microrelief, method of final elements, thermal cycle.*

### Введение

Создание современных технологий газотермического напыления, характеризующихся высокими и сверхвысокими скоростями осаждения напыляемого материала на основу, меняет условия подготовки поверхности перед напылением. Первым показателем качества поверхности становится концентрация дефектов кристаллического строения поверхностного слоя детали [1–3].

Одним из передовых способов подготовки поверхности детали, обеспечивающих максимальную активацию поверхности, является ультразвуковая финишная обработка поверхности (УФО). В процессе УФО за счет множественного воздействия ударного инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой, поверхность детали пластически деформируется, модифицируя структуру поверхностного слоя на глубину до 400 мкм. Повышение

плотности вакансий и дислокаций, формирование субструктуры вплоть до наноразмерной, создание сжимающих напряжений обеспечивает максимальную скорость протекания топокхимических реакций между напыляемым материалом и материалом основы [4–6].

При УФО на поверхности формируется периодический микрорельеф с регулируемыми параметрами. Меняя скорость перемещения детали и подачи ультразвукового инструмента, можно менять высоту и геометрию микронеровностей, создавая определенный микрорельеф поверхности. Микрорельеф влияет на процесс растекания и пластической деформации напыляемых частиц, условия охлаждения напыляемого материала и, в совокупности с активацией поверхности, обуславливает схватывание на границе «покрытие – основа».

В данной работе поставлена задача оценить влияние микрорельефа поверхности, сформированного УФО, на процесс нанесения покрытия, а именно на изменения условий охлаждения напыляемого материала. Для решения поставленной задачи применяется численный метод конечных элементов. Численно моделируется процесс затвердевания слоя газотермически напыленного материала на основу из стали с различным микрорельефом.

#### Выбор расчетной схемы поверхности основы

Для создания расчетной схемы поверхности основы использовались экспериментальные данные. Подготовку поверхности детали из углеродистой стали 20 к напылению производят рабочим инструментом, закрепленном в суппорт токарного станка и состоящем из ультразвукового преобразователя, концентратора и установленного в нем твердосплавного индентора шаровидной формы. Мощность ультразвукового генератора 200 Вт, частота колебаний индентора 24 кГц, усилие прижима 75 Н и амплитуда колебания 7 мкм. Число оборотов шпинделя токарного станка 100 об/мин, скорость подачи ультразвукового инструмента составляет 0,2; 0,1 и 0,04 мм/об. Рабочий инструмент, нормально колеблющийся с ультразвуковой частотой, формирует в направлении подачи инструмента профиль поверхности, образованный плавно переходящими друг в друга впадинами округлой формы и выступами без острых кромок и трещин. Микрорельеф в направлении движения инструмента задается отдельными ударами инструмента, накладываемых друг на друга с микронным смещением. Таким образом, поверхность приобретает чередующуюся в двух направлениях морфологию.

При скорости подачи ультразвукового инструмента 0,2 мм/об формируется микрорельеф, представляющий винтовую канавку с шагом микронеровностей  $S=0,2$  мм. В направлении продольной подачи инструмента шероховатость  $R_z=4,4$  мкм (рис. 1, а), в направлении вращательного движения детали шероховатость  $R_z=0,7$  мкм. Со снижением скорости подачи инструмента уменьшается шаг микронеровностей и высоты микровыступов. Так

при скорости подачи ультразвукового инструмента 0,1 мм/об шероховатость в направлении продольной подачи инструмента  $R_z=2,3$  мкм (рис. 1, б) с шагом микронеровностей  $S=0,1$  мм, в направлении вращательного движения детали  $R_z=0,9$  мкм. После ультразвуковой обработки со скоростью подачи 0,04 мм/об на всей поверхности металла формируется однородный микрорельеф со слабо выраженной периодичностью в направлении продольной подачи инструмента и шероховатостью  $R_z=1,2$  мкм (рис. 1, в).

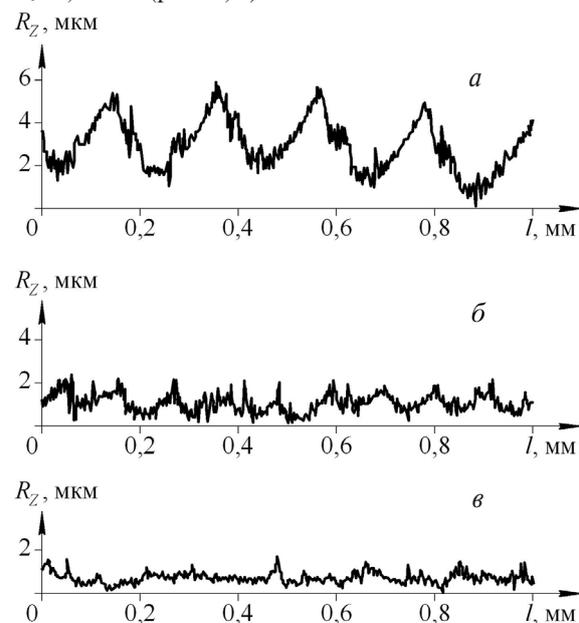


Рис. 1. Профиль поверхности стали 20 после УФО со скоростью подачи: а) 0,2; б) 0,1; в) 0,04 мм/об

Для проведения численных расчетов и сравнительного анализа полученных результатов были приняты упрощенные расчетные схемы формы поверхности основы.

Как видно из анализа морфологии поверхности основы, после ультразвуковой обработки поверхность основы покрыта выступами и впадинами в виде канавок, регулярность которых задается параметрами  $R_z$  и  $S$ . В направлении вращательного движения детали формируется субшероховатость, однако параметры ее малы и в данной задаче ими пренебрегли. В численном расчете форма канавок аппроксимирована так, как показано на рис. 2, где  $L$  – расстояние между пиками;  $H$  – глубина канавки. В этом случае задача о термическом состоянии основы и напыленного материала решается в двумерной постановке. Рассчитываются условия охлаждения напыляемого материала для точек, которые находятся вблизи границы «покрытие – основа» на расстоянии  $2,83 \cdot 10^{-5}$  мм. Первая точка находится над пиком (точка 1), а вторая над впадиной (точка 2). Вследствие симметрии задачи рассматривается область, ограниченная линиями, проходящими через точки 1 и 2 (рис. 2).

В модельных расчетах расстояние между пиками  $L$  берется как значение среднего шага неровно-

стей по вершинам  $S$ . Высота выступа считается соизмеримой со значением  $Rz$ . Экспериментальные и расчетные параметры рельефа поверхности основы приведены в табл. 1.

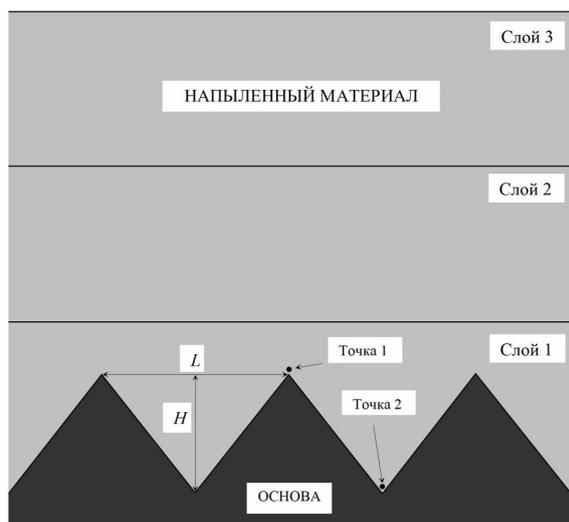


Рис. 2. Расчетная двумерная схема поверхности основы, полученная УФО (расчетная область ограничена линиями, проходящими через точку 1 и 2)

Таблица 1. Экспериментальные и принятые для расчета параметры рельефа поверхности основы

Эксперимент		Расчет	
$S$ , мкм	$Rz$ , мкм	$L$ , мкм	$H$ , мкм
200	4,4	200	4
100	2,3	100	2
40	1,2	50	1

### Моделирование процесса охлаждения напыляемого материала

Для численного описания процесса кристаллизации и охлаждения напыляемого материала на основе использовалось решение нестационарного уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода расплав – твердый материал с применением метода конечных элементов [7].

Материал основы – сталь 45, напыляемый материал – сплав на основе никеля, имеющий состав NiCrB. В табл. 2 приведены теплофизические характеристики материалов.

Рассматриваются 4 слоя: основа и три слоя напыленного материала. Толщина основы 10 мм. Слой напыленного материала имеет эквивалентную толщину – 10 мкм. Под эквивалентной толщиной понимается толщина слоя материала, напыленного на гладкую поверхность при одинаковом режиме напыления. Полагается, что слой формируется мгновенно, а следующий слой появляется через временной промежуток  $\Delta t = 8,92 \cdot 10^{-3}$  с. В пределах отдельного слоя изменение температуры во времени описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

где  $k$ ,  $\rho$  и  $c$  – соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость материала. Термодинамические характеристики материала полагаются независимыми от температуры в рамках существования определенного фазового состояния. Они изменяются при переходе материала в другое фазовое состояние. Ось  $x$  лежит в горизонтальной плоскости и направлена перпендикулярно движению обрабатывающего инструмента. Ось  $y$  направлена по нормали к поверхности основы.

Таблица 2. Теплофизические характеристики исследуемых материалов на основе [8]

Характеристики	Сталь 45		NiCrB
	Твердая фаза	Твердая фаза	Жидкая фаза
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7800	7900	8700
Удельная теплоемкость, Дж/(К·м <sup>3</sup> )	481	600	443
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	45,38	58	80
Удельная теплота плавления, Дж/кг	0,84·10 <sup>5</sup>		2,85·10 <sup>5</sup>
Температура плавления, К	1750		1400

На границе раздела двух слоев выполняется условия непрерывности температуры и теплового потока

$$T_I = T_{II},$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_I = k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{II},$$

где  $n$  – вектор нормали к границе раздела слоев.

Предполагается, что теплообмен на свободной границе пренебрежимо мал. В результате имеем следующие граничные условия. На свободной границе и боковых границах расчетной области ставится условие

$$\frac{\partial T}{\partial n_b} = 0, \tag{1}$$

где  $n_b$  – вектор нормали к границе расчетной области.

На нижней границе основы (толщина основы 10 мм) задана температура  $T_0 = 20$  °С.

В качестве начальных условий для основы задается температура  $T_0$ . Остальной материал имеет начальную температуру, равную температуре плавления 1127 °С.

Для учета эффекта кристаллизации напыленного материала строится функция энтальпии

$$H = \int \rho c(T) dT, \tag{2}$$

с учетом скрытой энергии фазового перехода. Значение  $\rho c$  при температуре  $T$  определяется дифференцированием (2) по  $T$  [7]. Причем скачок  $H$  в точке фазового перехода размывается на несколько градусов.

Задача решается численно, методом конечных элементов. Процедура напыления новых слоев реализуется следующим образом. В начале строится конечно-элементная сетка для подложки и всех

трех слоев напыленного материала. Но для двух верхних слоев задается очень маленький коэффициент теплопроводности  $10^{-6}$  Вт/(м·К). В результате на верхней поверхности первого слоя реализуется граничное условие (1). В момент образования второго слоя, ему задается реальное значение  $k$ . То же самое делается и для третьего слоя.

### Обсуждение результатов расчета

С помощью описанной численной модели построены зависимости изменения температуры от времени в исследуемых точках первого слоя напыленного материала. Обнаружено, что для всех расчетных точек поверхностей характер временных зависимостей качественно не меняется. На рис. 3 показан общий вид расчетной зависимости в точке 1 для основы с высотой микронеровностей 4 мкм.

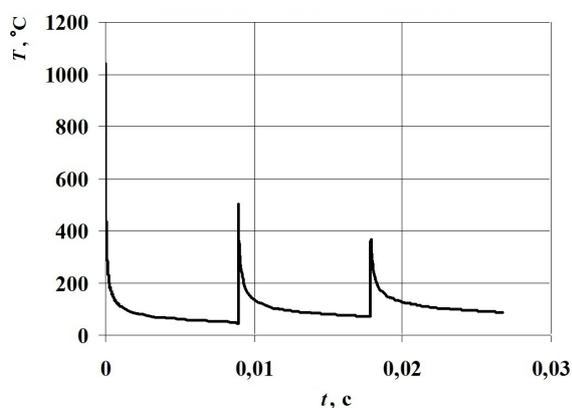


Рис. 3. Зависимость изменения температуры от времени в точке 1 первого слоя напыляемого материала для основы с высотой микронеровностей 4 мкм

В начальный момент времени температура быстро падает, переходя затем к плавному затуханию. При образовании нового слоя температура снова резко повышается, и затем процесс остывания повторяется. Однако при формировании второго и третьего слоя напыляемого материала, температура как в точке 1, так и в точке 2 повышается значительно меньше. Так, температура нагрева на вылете в точке 1 в момент осаждения второго слоя составляет 490 °С. Во впадине (точка 2) нагрев происходит примерно до тех же значений. При осаждении третьего слоя температура не поднимается выше 395 °С. Для других значений микронеровностей характер временных зависимостей качественно не меняется.

Таким образом, кристаллизация напыленного материала первого слоя происходит значительно быстрее осаждения последующего слоя. Несмотря на это, необходимо учитывать, что сформированная при сверхвысоких скоростях охлаждения неравновесная структура напыленного материала при последующем нагреве вновь осаждаемым вторым слоем может изменить свое строение в сторону более равновесного состояния.

Рассмотрим этап охлаждения расплава и начала кристаллизации первого слоя во временном интер-

вале до  $5 \cdot 10^{-8}$  с и этап кристаллизации и охлаждения кристаллизованного напыленного материала за время  $5 \cdot 10^{-5}$  с. В качестве примера взята основа с высотой микронеровностей 4 мкм (рис. 4).

На начальном этапе остывания первого слоя кратковременное охлаждение жидкой фазы переходит в стадию начала кристаллизации (рис. 4, а). Надо отметить, что графики начинаются с момента времени  $8,92 \cdot 10^{-10}$  с, а начальная температура напыляемого материала равна 1127 °С. Скорость охлаждения расплава составляет около  $10^{10}$  °С/с, что соответствует сверхвысоким скоростям охлаждения [9]. Как видно из графиков на рис. 4, а, максимальная скорость охлаждения достигается во впадине, так как в этих местах напыляемый материал со всех сторон окружен теплопроводящей основой.

Во всех расчетных точках процесс охлаждения расплава заканчивается быстрее, чем за  $10^{-8}$  с, и переходит в процесс кристаллизации, когда температура изменяется медленно, либо вообще не меняется (рис. 4, а). Это связано с тем, что в слое напыленного материала в процессе затвердевания жидкой фазы выделяется тепло, стабилизирующее температуру в расчетных точках и понижающее скорость охлаждения.

Процесс начала кристаллизации на пиках и во впадинах идентичен. Вид кривых охлаждения одинаков – температура в расчетных точках устанавливается в интервале значений 845...860 °С и на пиках шероховатости в расчетном промежутке времени не меняется, а во впадинах несколько снижается за счет теплоотвода. Температура несколько выше на пиках, однако, разница температур в точке 1 и точке 2 незначительна и не превышает 15 °С.

На рис. 4, б, представлены расчетные зависимости процесса дальнейшего охлаждения напыленного материала, который характерен тем, что жидкая фаза перестает влиять на температуру в рассматриваемых точках. На графиках (рис. 4, б) видно, что период времени с относительно стабильной температурой в точках наблюдения завершается и происходит переход ( $t_{пер}$  – время перехода) к интенсивному остыванию материала. Графики начинаются с момента времени  $5 \cdot 10^{-8}$  с, то есть являются продолжением выше описанных зависимостей.

Из результатов расчетов следует, что время  $t_{пер}$  для точки 1 составляет от  $4,46 \cdot 10^{-6}$  с, для точки 2 –  $8,03 \cdot 10^{-6}$  с. Момент перехода фиксируется на графиках изменения скорости охлаждения (рис. 4, б) всплеском значений. При этом скорость охлаждения меняется следующим образом. Вначале скорость охлаждения уменьшается до минимума, затем увеличивается, достигая локального максимума, и опять уменьшается.

Такое изменение скорости охлаждения обусловлено спецификой подвода выделившейся скрытой теплоты кристаллизации к расчетной точке напыленного слоя. В момент кристаллизации подвод выделившейся скрытой теплоты приводит к тому, что температура в слое напыленного материала, лежащего в непосредственной близости от границы раз-

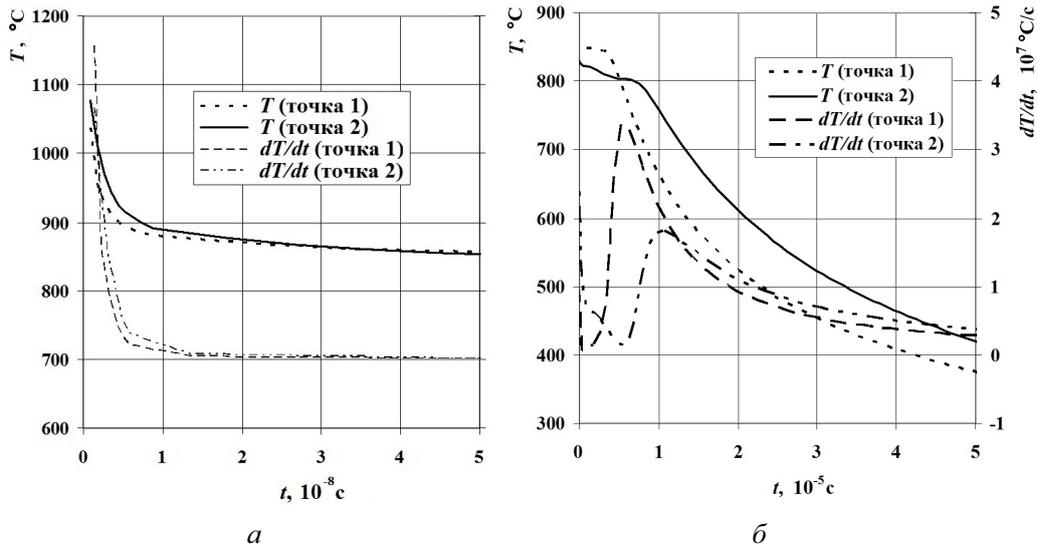


Рис. 4. Зависимость изменения температуры ( $T$ ) и скорости охлаждения от времени ( $dT/dt$ ) на начальном этапе остывания (а) и на этапе дальнейшего охлаждения (б) напыленного материала на основу с высотой микронеровностей 4 мкм

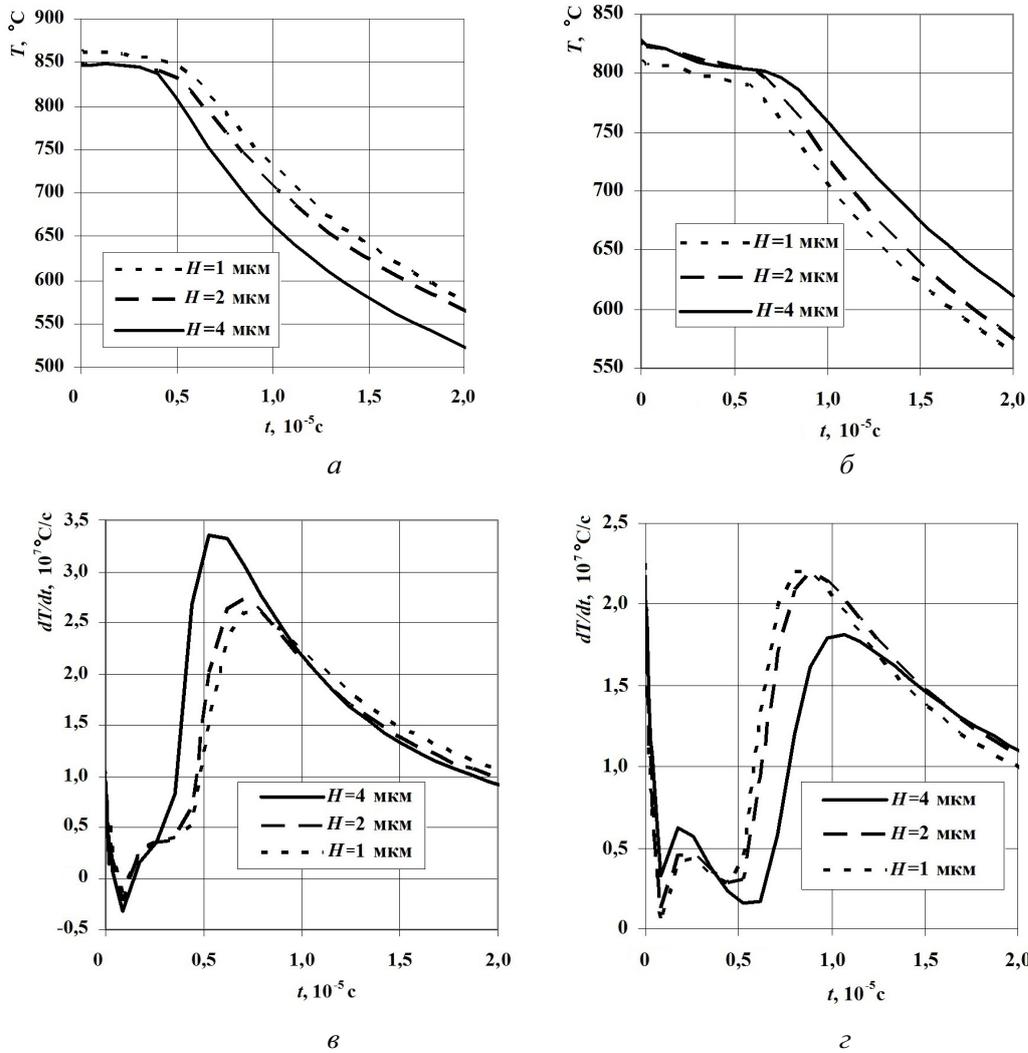


Рис. 5. Зависимость изменения температуры ( $T$ ) (а, б) и скорости охлаждения от времени ( $dT/dt$ ) (в, г) на этапе кристаллизации и охлаждения напыленного на основу материала в точке 1 (а, в) и точке 2 (б, г) с учетом разной морфологии основы, заданной режимами УФО

дела с подложкой, стабилизируется. По мере того, как нарастает слой закристаллизовавшегося материала, скорость охлаждения начинает увеличиваться, так как закристаллизовавшийся слой является своеобразным теплоизолятором, препятствующим притоку тепла из области, где процесс кристаллизации еще не завершился. В этот момент скорость охлаждения достигает локального максимума, положение которого соответствует точке перегиба ( $t_{пер}$ ) на графике зависимости температуры от времени на рис. 4, б. После того, как процесс кристаллизации закончился, скорость охлаждения уменьшается обычным образом, обусловленным приближением системы к термическому равновесию.

Рассмотрим влияние на процесс кристаллизации напыленного материала параметров микрорельефа поверхности основы, полученной на разных режимах УФО (рис. 5).

На термические процессы, происходящие на этапе охлаждения расплава и начала кристаллизации первого слоя, особенности микрорельефа поверхности, полученного на разных режимах УФО, влияют не значительно. В момент времени  $5 \cdot 10^{-8}$  с самый большой градиент температур в точках 1 и 2 наблюдается на поверхности с  $H=1$  мкм (рис. 5, а, б). Это обусловлено тем, что на такой поверхности более острая форма выступов и впадин увеличивает градиент температуры за счет изменения условий теплоотвода.

Несмотря на это, на этапе кристаллизации и охлаждения напыленного материала за время  $2 \cdot 10^{-5}$  с, поверхность с максимальной высотой и шагом микронеровностей имеет в расчетных точках максимальный градиент температуры (рис. 5, а, б) и скорость охлаждения, что особо наглядно подтверждают графики зависимости скорости охлаждения от времени (рис. 5, в, г). В точке 1 поверхности с  $H=4$  мкм всплеск значений скорости охлаждения достигает  $3,4 \cdot 10^7$  °C/с, в точке 2 имеет минимальное значение  $1,75 \cdot 10^7$  °C/с. В момент времени  $2 \cdot 10^{-5}$  с на поверхности с  $H=1$  мкм температура в точках 1 и 2

выравнивается, в то время как на поверхности с  $H=4$  мкм сохраняется температурный градиент в 100 °C (рис. 5, а, б).

Следовательно, поверхность, полученная УФО с максимальной высотой и шагом микронеровностей, создает более неоднородные условия охлаждения напыленного материала.

#### Выводы

1. Для численного описания процесса кристаллизации и охлаждения напыляемого материала на основе Ni с использованием профилометрического анализа выбрана расчетная двухмерная схема поверхности основы, полученной ультразвуковой финишной обработкой.
2. Получены зависимости изменения температуры и скорости охлаждения от времени на этапе охлаждения расплава, кристаллизации и остывания напыленного материала. Показано, что условия охлаждения напыляемого материала зависят от микрорельефа поверхности – высоты и шага микронеровностей.
3. На всех исследуемых поверхностях процесс кристаллизации напыленного материала первого слоя заканчивается до осаждения последующего слоя. При образовании нового слоя температура в первом слое вновь повышается, до значительно меньших значений, что необходимо учитывать при описании процесса структурообразования покрытия.
4. Определено, что поверхность с максимальной высотой и шагом микронеровностей создает максимальный градиент скорости охлаждения напыленного материала и температуры охлаждения в расчетный конечный момент времени.
5. С помощью представленной численной модели можно подбирать оптимальный микрорельеф поверхности основы исходя из особенностей метода напыления и требуемых от покрытия структуры и свойств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдаев Л.Х., Калита В.И. Современные тенденции получения газотермических покрытий // *Технология металлов*. – 2003. – № 2. – С. 17–20.
2. Харламов Ю.А., Борисов Ю.С. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями // *Автоматическая сварка*. – 2001. – № 6. – С. 19–25.
3. Ревун С.А., Балакирев В.Ф. Особенности образования адгезионной связи при газотермическом напылении покрытий // *Физика и химия обработки материалов*. – 2002. – № 2. – С. 55–62.
4. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Агафонова Н.С., Толмачев А.И., Зайцев К.В., Иванов Ю.Ф. Ультразвуковое модифицирование – метод подготовки поверхности перед газотермическим напылением // *Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: Матер. VIII Междунар. практ. конф.* – СПб., 2006. – Ч. 1. – С. 150–158.
5. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Ульяничский В.Ю., Зайцев К.В., Борозна В.Ю. Влияние ультразвуковой обработки основы на формирование покрытия при детонационном напылении // *Технология машиностроения*. – 2008. – № 7. – С. 22–26.
6. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Зайцев К.В., Толмачев А.И. Исследование адгезии покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 310. – № 3. – С. 57–61.
7. Самарский А.А., Вабишевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
8. Солоненко О.П., Смирнов А.В., Клименов В.А. и др. Роль границ раздела при формировании сплэтов и структуры покрытий // *Физическая мезомеханика*. – 1999. – Т. 2. – № 1–2. – С. 123–140.
9. Сверхбыстрая закалка жидких сплавов / под ред. Г. Германа. – М.: Металлургия, 1986. – 286 с.

Поступила 13.05.2010 г.