

УДК 539.21:541.182

Г.И. КОСТЮК¹, В.Н. ПАВЛЕНКО¹, МУСТАФА ЭЗЗАТ СУККАРИЕХ¹, К.П. ИСЯК²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *ГП «Завод им. В.А. Малышева», Харьков*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО - ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости получены поля температур и температурных напряжений, которые при определенном составе по сорту, энергии и зарядности ионов или разных энергий электронов, их плотности тока создаются условия для образования наноструктур. Для случая действия трех потоков электронов различной энергии и плотности токов экспериментально получены наноструктуры и теоретически обосновано их образование на стали 50 с микротвердостью до 45 ГПа. Все это позволяет утверждать возможность получения наноструктур при действии потоков электронов.

Ключевые слова: наноструктуры, поля температур, температурные напряжения, ион, электрон.

Введение

В настоящее время известны способы получения наноструктур при действии потоков ионов с использованием магнетронных и дуговых источников ионов [1], тогда как получение наноструктур при помощи потоков электронов еще не предлагалось, поэтому теоретическое и экспериментальное исследование возможности создания наноструктур при действии потоков ионов с разных энергий, сортов и зарядности, и электронов различных энергий и плотностей токов является актуальным.

Работа выполнялась по госбюджетным темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

1. Постановка задач теоретического и экспериментального исследования

Решались совместные задачи теплопроводности, термоупругости при действии индивидуальных ионов и электронов постановка которых приведена в работах [2 – 4] только в этих случаях рассматривалось одновременное действие ионов разных сортов, энергий и зарядности, а также электронов с различной энергией, что необходимо для более полного заполнения объема поверхностного слоя полями температур и температурных напряжений, в котором необходимо получить наноструктуры причем величины температур должны превышать необхо-

димые для образования наноструктур (500 - 1500 К), скорости их нарастания должны превышать 10^7 к/с, и давление, а значит, величины температурных напряжений превышать или приближать к 10^9 Па. Выполнения этих условий позволит получать наноструктуры. Так как максимальные значения температурных напряжений реализуются и при плотностях тока равных первой критической [2] плотности токов для соответствующих сортов, зарядностей и энергии и обрабатываемого материала будем принимать равной первой критической, что обеспечит также хорошее заполнение полями температур и напряжений требуемого объема поверхностного слоя, что повысит эффективность обработки.

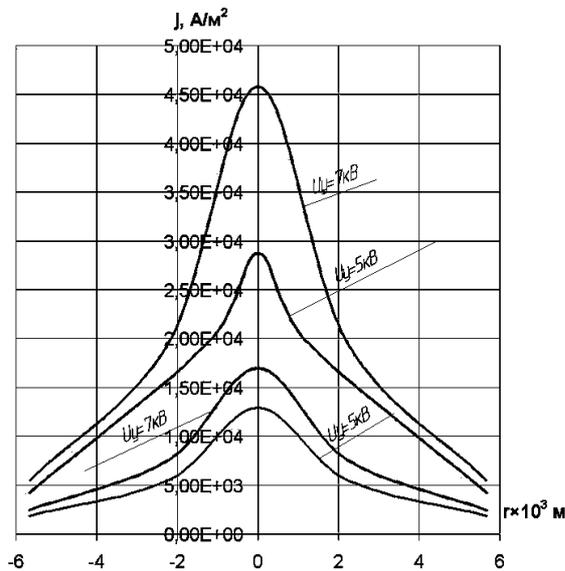
Проверка теоретических предположений требует экспериментального исследования, которое проводилось для электронов, использовалась электронные пушки конструкции Тренивой, пушка с дополнительной электростатической и магнитной фокусировкой, распределение плотностей токов по радиусу для различных конструкций и энергий электронов представлены на рис. 1.

2. Результаты расчета полей температур и температурных напряжений при действии ионов различных сортов, зарядности и энергии, возможность получения наноструктур

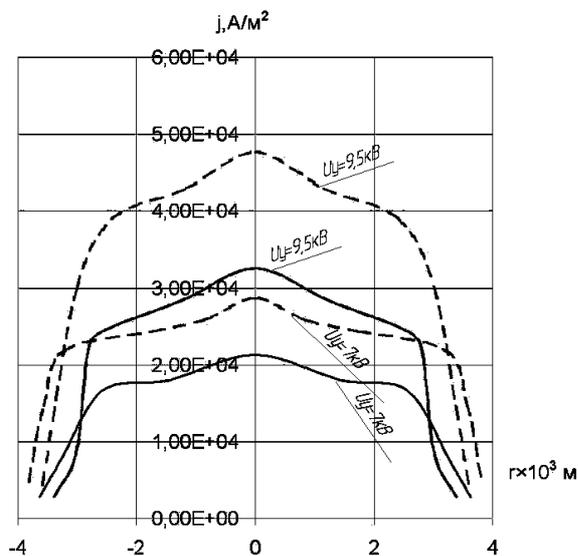
При решении задачи рассматривалось действие 25 ионов на сталь, действующих на одинаковом расстоянии друг к другу, из них: 4 (частицы А – Ti^+ с энергией 10^3 эВ (однозарядные)) со средним проек-

тивным пробегом по глубине и энергии; 5 (частицы В – N^+ с энергией $2 \cdot 10^3$ эВ (трехзарядные)) с максимальным проективным пробегом и 16 (частицы С – Ti^+ и N^+ с энергией 250 эВ (однозарядные)) с минимальными пробегами (рис. 2).

Распределение температур по глубине имеет максимумы при координате x несколько большей, чем половина проективного пробега $0,5L_i$ (максимум выделения энергии приходится на $x = L_i/2$), что связано с более интенсивным охлаждением поверхности $x = x$, чем $x = L_i$. Максимальные температуры реализуются в зоне действия частиц В и составляет $T_{max} = 2100$ К (рис. 2). Такое рассмотрение характера распределения температур только по глубине не дает возможности выяснить их распределение в плоскостях параллельных поверхности только на разных глубинах, что необходимо для оценки интегрального температурного действия ионов на различных поверхностях.



а



б

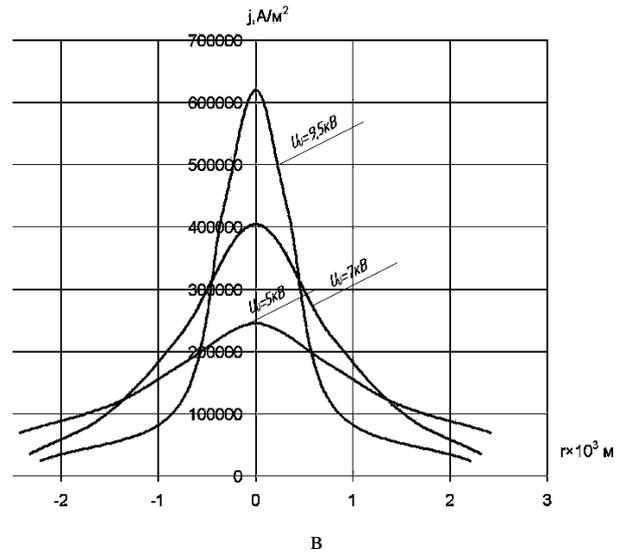


Рис. 1. Распределение плотности электронного тока по радиусу пучка в зоне взаимодействия с мишенью: а – пушка С.Н. Тренивой; б – модифицированная конструкция пушки С.Н. Тренивой; в – пушка с электростатической и магнитной фокусировкой

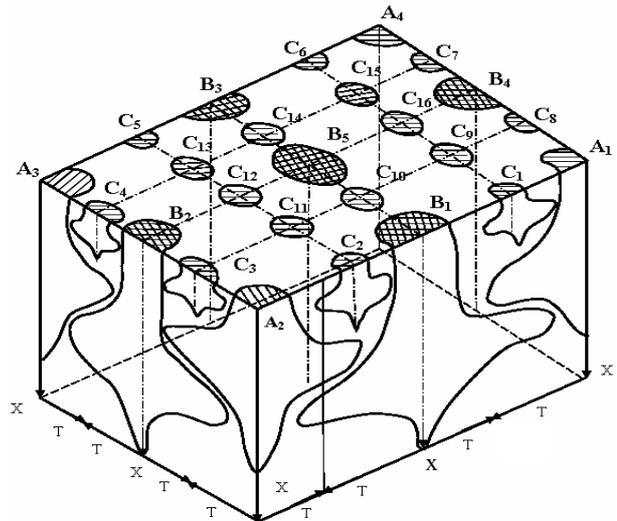


Рис. 2. Схема зон распространения температурных полей к концу действия тепловых источников (частиц различных энергий либо сортов) в предположении, что имеем частицы А (4 шт. – средняя энергия или средний по величине пробег иона), частицы В (5 шт. – максимальная энергия или максимальный по величине пробег) и частицы С (16 шт. – максимальная энергия или пробег), $T_{max} = 2100$ К

Поля температур на поверхностях $x = 0$, $x = 0,5\lambda_0$, $x = 0,5\lambda_A$, $x = 0,5\lambda_B$ и $x = 0,9\lambda_B$. А при действии рассматриваемых ионов в тех же точках A_1-A_4 , B_1-B_5 , C_1-C_{16} (в точках А ион Ti^+) при образовании наноструктур заполнение поверхности будет высоким, а, следовательно, высока вероятность измельчения зерна до наноструктур (рис. 3).

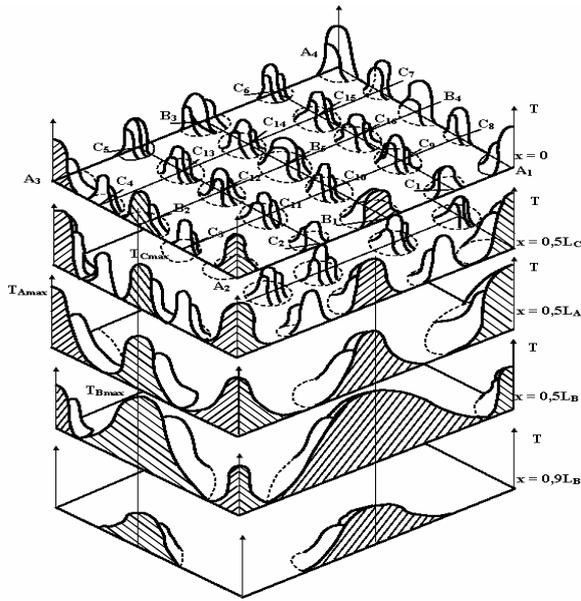


Рис. 3. Поля температур на плоскостях $x = 0$, $x = 0,5L_A$, $x = 0,5L_C$, $x = 0,5L_B$, $x = 0,9L_B$ к концу действия тепловых источников (частиц-ионов различных энергий и сортов) в предположении, что одновременно заканчивается тепловое действие частиц и имеем частные А – средняя энергия - средний пробег), частица В (5 шт. - максимальная энергия, большой пробег) и частицы С (16 – шт. – минимальная энергия и пробег)

На поверхности $x = 0,55L_B$ наблюдаются максимальные температуры для частиц В ($T_{Bmax} = 2100$ К), для частиц А они значительно ниже, но достаточны для измельчения зерна до наноструктур, этому может способствовать частица катализатор Ti , а, с учетом релаксации температурного поля, при остывании поверхность, на которой этот процесс происходит, существенно возрастет (так как даже при 700 К возможно появление нанокристаллов, рис. 3).

Поверхность же $x = 0,9L_B$ менее подвержена нанокристаллизации, так как, несмотря на то, что в зоне действия температурных полей и возможно получение наноструктур, но площади этих зон незначительны.

Высокие скорости роста температуры в зоне действия частиц также дополнительно могут стимулировать образование наноструктур и формирование нанопокровов на поверхности с энергией 10^3 эВ (в точке В – ион N^+ с энергией $2 \cdot 10^3$ эВ, в точке С – ион Ti^+ и N^+ с энергией 250 эВ). Анализ температурных полей на плоскости $x = 0$ показывает, что при выбранных плотностях токов ионов (они не превышают первой критической [1]) наблюдаются распределения температур как для случая действия индивидуальных ионов, величины температур для частиц В максимальны, для частиц А несколько ниже, а для частиц С еще ниже ($T_{Amax} = 1100$ К), но на зна-

чительной части поверхности изменилась температура и это изменение существенно (от 600 до 1000 К). В этом диапазоне согласно [1] в отдельных местах есть вероятность образования наноструктур при наличии инициатора (иона титана, см. рис. 3).

На поверхности $x = 0,5L_C$ наблюдается максимальная температура для частиц С ($E_i = 250$ эВ) и достигает величин до 1200 К, в тоже время для частиц А она выше (1300 К), а для частиц В значительная, но не ниже, чем для А (1250 К), здесь заполнение температурными полями высоко и во время остывания заполнение будет практически стопроцентное – вероятность получения наноструктур высока (рис.3).

Поверхность $x = 0,5L_A$ характеризуется максимальной температурой для частиц В ($T_{Bmax} = 1750$ К), а для частиц А ($T_{Amax} = 1900$ К). В этом случае, несмотря на недостаточное заполнение поверхности областями с высокой температурой, учитывая охлаждение с распространением температурного поля при остывании, но еще при достаточной для реализации процесса.

Наличие существенных давлений в материале за счет действия температурных напряжений в момент формирования температурного поля может положительно повлиять на увеличение вероятности образования наноструктур в зоне действия температурных напряжений.

Проведем исследование величин температурных напряжений, как по глубине рассматриваемого объема, так и на исследованных поверхностях. Так распределение температурных напряжений по глубине представлено на рис. 4.

Видно, что температурные напряжения имеют два максимума в зоне максимальных градиентов температур, максимальные напряжения реализуются для частицы В ($E = 2 \cdot 10^3$ эВ) вблизи половины пробега, что говорит о необходимости исследования напряжений на ранее рассматриваемых поверхностях.

Результаты исследования полей температурных напряжений на тех же плоскостях, что и проводилось рассмотрение полей температур (рис. 3) представлены на рис. 5. Видно, что распределение температурных напряжений имеет такое же заполнение, как и распределение температур, т.е. есть возможность в довольно большом объеме (до $0,5L_B$) реализовать напряжения, близкие к необходимым для образования наноструктур, максимальные напряжения реализуются для частицы В на поверхности $x = 0,5L_B$ и составляет $1,7 \cdot 10^9$ Н/м², на глубине же $x = 0,5L_A$ максимальные напряжения составляют только $1,2 \cdot 10^9$ Н/м², а при $x = 0,5L_C$ – составляют $9 \cdot 10^8$ Н/м², т.е. в этом случае необходимо действие сразу многих критериев температуры и скорости роста температуры дадут возможность получения наноструктур.

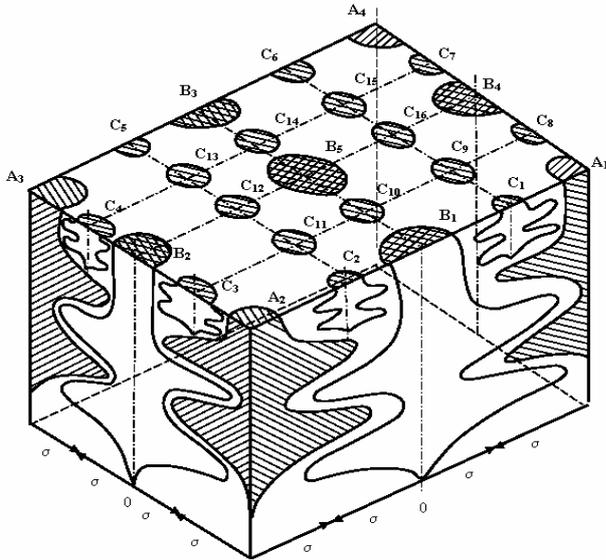


Рис. 4. Схема зон распространения по глубине полей температурных напряжений к концу действия тепловых источников (частиц различных энергий либо сортов) в предположении, что имеем частицы А (4 шт. - средняя энергия или средний по величине пробег иона), частицы В (5 шт. - максимальная энергия или максимальный по величине пробег) и частицы С (16 шт. - минимальная энергия или пробег), $\sigma_{\max} = 1,7 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$

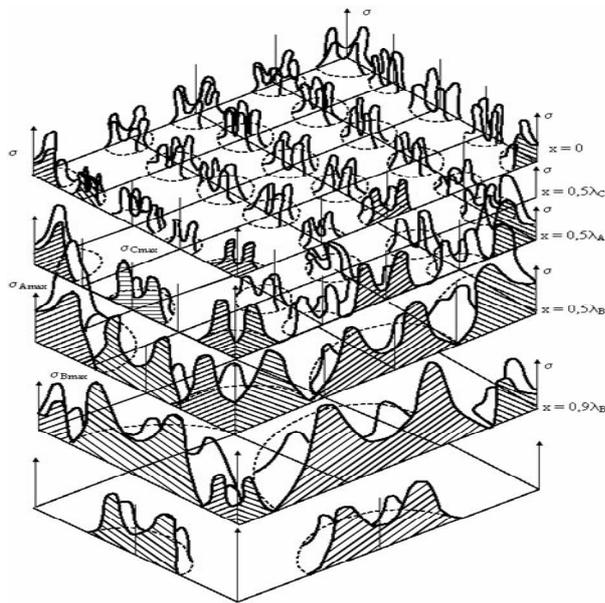


Рис. 5. Поля температурных напряжений на плоскостях $x = 0$, $x = 0,5\lambda_c$, $x = 0,5\lambda_A$, $x = 0,5\lambda_B$, $x = 0,9\lambda_B$ к концу действия тепловых источников (частиц ионов различных сортов или энергий) в предположении одновременного окончания теплового действия имеем частицы А (средняя энергия $E_i = 10^3 \text{ эВ}$, средний пробег), частица В (5 шт., максимальная энергия, большой пробег) и частицы С (16 шт., минимальная энергия и пробег)

На рис. 5 представлены распределения температурных напряжений на поверхностях $x = 0$, $x = 0,5\lambda_c$, $x = 0,5\lambda_A$, $x = 0,5\lambda_B$, $x = 0,9\lambda_B$. Видно, что и в этих плоскостях они имеют распределение с кольцевым максимумом в зоне действия максимальных градиентов температур, максимальные значения величин температурных напряжений реализуются в зоне действия частицы В и составляют $1,7 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, т.е. значение порядка величин необходимых для реализации образования наноструктур, в области действия частиц А величина напряжений снижается до $1,1 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, в этом случае, также возможно образование наноструктур, но вероятность меньше. В зоне действия частицы С температурные напряжения становятся еще ниже и составляют $8 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ для ионов азота и $7,3 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ для ионов титана.

3. Поля температур и температурных напряжений при действии ряда электронов с различной энергией

Поля температур

Проводилось рассмотрение действия пяти электронов А с $E_{eA} = 9,9 \cdot 10^3 \text{ эВ}$, четырех электронов В с энергией $E_{eB} = 6,9 \cdot 10^3 \text{ эВ}$ и четырех электронов С с энергией $E_{eC} = 3,3 \cdot 10^3 \text{ эВ}$ при их действии на деталь из стали 50. Рассматривалось распределение температур на глубине детали в зоне действия этих частиц за время столкновений (принималось, что окончание теплового действия этих частиц реализуется одновременно). Расстояние между частицами соответствовало первой критической плотности тока [2], когда поля температур от действия соседних частиц не пересекаются. В этом случае, а также в результате наличия максимальных градиентов температур должны реализовываться температурные напряжения максимальных значений.

На рис. 6. представлено распределение температур по глубине от действия частиц А, В и С. Видно, что глубина проникновения наиболее высокоэнергетичных электронов порядка 10^{-6} м , что примерно $1,3\lambda_e$. Максимум температуры реализуется на глубине $0,9\lambda_e$ и составляет $3,2 \cdot 10^3 \text{ К}$, для частицы А максимум температуры также вблизи и равен $1,2 \cdot 10^3 \text{ К}$, а для частицы С – максимум составляет 970 К и вблизи $0,9\lambda_e$. Поля температур по глубине удачно дополняют друг друга и способствуют заполнению объема полем температур. Для того чтобы убедиться в этом, рассмотрим характер заполнения температурным полем объема на таких поверхностях: $x = 0$, $x = 0,9\lambda_{eC}$, $x = 0,9\lambda_{eA}$, $0,9\lambda_{eB}$ и $x = 1,1\lambda_{eA}$ (рис. 7.). Заполнение объема полем тем-

ператур также при $x = 1,1\lambda_{eA}$ получается достаточно полное. Значение температур изменяется от 600 К на поверхности и до 520 К на глубине $x = 1,1\lambda_{eA}$, причем в фиксированных точках $0,9\lambda_{eC}$, $0,9\lambda_{eB}$ и $0,9\lambda_{eA}$ соответственно составляют 970 К, $1,2 \cdot 10^3$ К и $3,2 \cdot 10^3$ К. Этих температур достаточно для зарождения наноструктур.

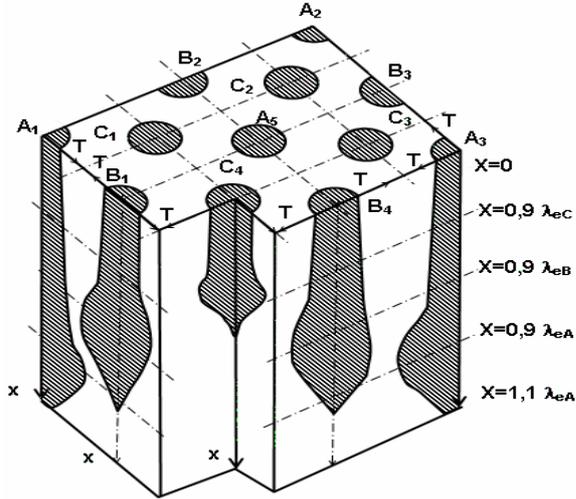


Рис. 6. Распределение температур по глубине при действии 5 электронов А ($E_{eA} = 9,9 \cdot 10^3$ эВ), 4 электронов В ($E_{eA} = 6,9 \cdot 10^3$ эВ), 4 электронов С ($E_{eA} = 3,2 \cdot 10^3$ эВ), $T_{\max A} = 3,9 \cdot 10^3$ К, $T_{\max B} = 1,2 \cdot 10^3$ К, $T_{\max C} = 970$ К

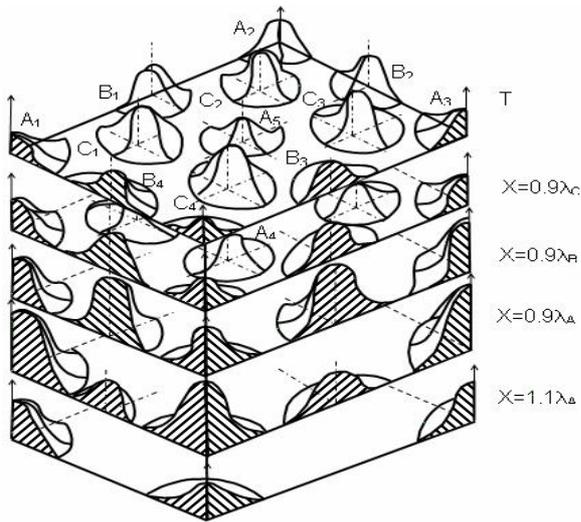


Рис. 7. Распределение температур на поверхностях $x=0$ ($T_{\max C} = 600$ К), $x=0,9 \lambda_C$ ($T_{\max C} = 970$ К), $x=0,9\lambda_B$ ($T_{\max B} = 1,2 \cdot 10^3$ К), $x=0,9\lambda_A$ ($T_{\max A} = 3,2 \cdot 10^3$ К), $x=1,1\lambda_A$ ($T_{\max} = 520$ К)

Поля температурных напряжений

Распределение температурных напряжений по глубине для тех же частиц А, В и С представлено на рис. 8.

Распределение температурных напряжений по глубине даже полнее заполняет объем детали по глубине элементарного объема, причем максимальные значения температурных напряжений составляют

$$\sigma_A = 8 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2, x = 0,9\lambda_{eA}; \sigma_B = 5,8 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2, x = 0,9\lambda_{eB} \text{ и } \sigma_C = 3,9 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2, x = 0,9\lambda_{eC}.$$

Для получения полной картины заполнения объема рассмотрим распределение температурных напряжений на тех же поверхностях $x = 0$, $x = 0,9\lambda_{eC}$, $x = 0,9\lambda_{eB}$ и $x = 1,1\lambda_{eA}$ (рис. 9).

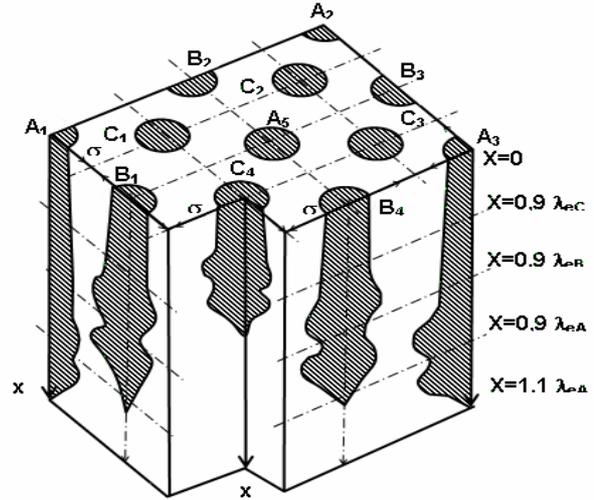


Рис. 8. Распределение температурных напряжений по глубине при действии 5 электронов А ($E_{eA} = 9,9 \cdot 10^3$ эВ), 4 электронов В ($E_{eA} = 6,9 \cdot 10^3$ эВ), 4 электронов С ($E_{eA} = 3,2 \cdot 10^3$ эВ), $\sigma_{\max A} = 8 \cdot 10^8$ Н/м², $\sigma_{\max B} = 5,8 \cdot 10^8$ Н/м², $\sigma_{\max C} = 3,9 \cdot 10^7$ Н/м²

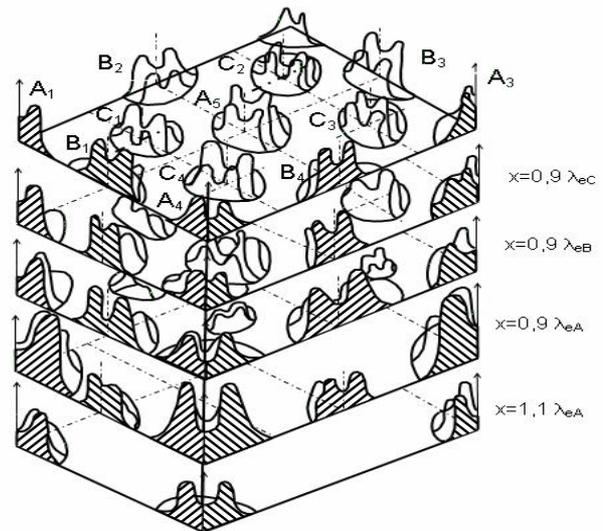


Рис. 9. Распределение температурных напряжений на поверхностях $x=0$ ($\sigma_{\max} = 2,3 \cdot 10^7$ Н/м²), $x=0,9 \lambda_{eC}$ ($\sigma_{\max} = 3,9 \cdot 10^7$ Н/м²), $x=0,9\lambda_{eB}$ ($\sigma_{\max} = 5,8 \cdot 10^8$ Н/м²), $x=0,9\lambda_{eA}$ ($\sigma_{\max} = 8 \cdot 10^8$ Н/м²), $x=1,1\lambda_{eA}$ ($\sigma_{\max} = 4 \cdot 10^7$ Н/м²)

На этих поверхностях соответственно реализуются максимальные напряжения $2,3 \cdot 10^7$ Н/м²; $3,9 \cdot 10^7$ Н/м²; $5,8 \cdot 10^8$ Н/м²; $8 \cdot 10^8$ Н/м² и $4 \cdot 10^7$ Н/м² (рис. 9). Заполнение объема полем температурных напряжений высокое, но величины не всегда достаточны для получения наноструктур, но вместе с получаемыми температурами и скоростью роста температуры, которые достигают 10^{12} - 10^{15} К/с, эти условия достаточны для зарождения наноструктур.

4. Результаты эксперимента по образованию наноструктур при действии электронов на сталь

Исследовалось одновременное действие электронов различных энергий на сталь 50:

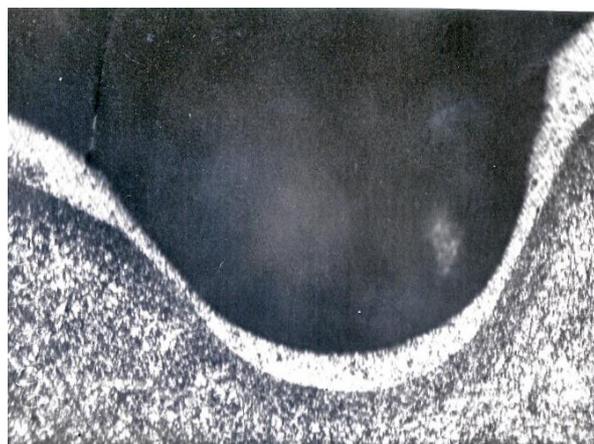
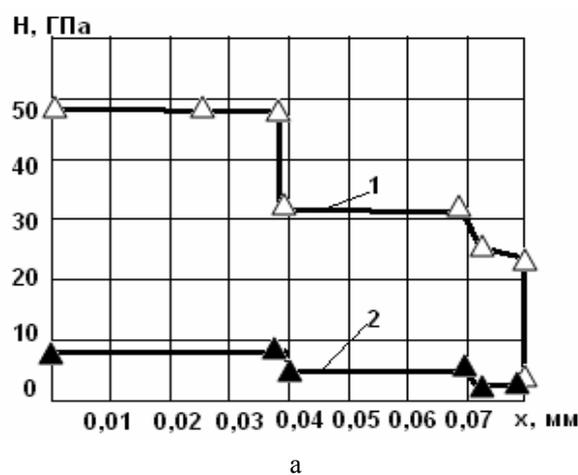
1 – первый поток с энергией 3,2 кэВ ($j = 9,1 \cdot 10^3$ А/м²), второй с энергией 6,9 кэВ ($j = 10^3$ А/м²), третий поток с энергией 9,9 кэВ ($j = 80$ А/м²);

2 – поток с энергией 6,9 кэВ ($j = 10^3$ А/м²).

Потоки электронов подавались с чередованием f_y действия (временем действия $t_a = 180$ мкс, частотой $f = 5$ Гц) первый, второй и третий, а далее последовательность повторяется. Плотности токов выбирались таковыми, чтобы были равны первой критической или вблизи нее, что позволяет обеспечивать максимальные по величине значения температурных напряжений ($\sigma_1 = 3,9 \cdot 10^7$ Н/м²; $\sigma_2 = 5,8 \cdot 10^7$ Н/м²; $\sigma_3 = 8 \cdot 10^7$ Н/м²) и достаточных для образования наноструктур температур ($T_{\max 1} = 970$ К; $T_{\max 2} = 1,2 \cdot 10^3$ К; $T_{\max 3} = 3,9 \cdot 10^3$ К). Результаты такого исследования представлены на рис. 10. Видно, что для первого случая (кривые 1, рис. 10, а) реализуется anomalно высокое значение микротвердости до 50 ГПа, когда во втором случае микротвердость составляет всего 5,7 ГПа и практически соответствует твердости закаленной стали 50. Наличие трех потоков позволяет обеспечить практически полное заполнение объема полями температур и температурных напряжений, наличие же высокоэнергетических электронов 9,9 кэВ позволяет достичь очень высоких скоростей нарастания температур, когда скорость кристаллизации высока, что способствует образованию наноструктур малого размера до 10 нм. Во втором случае на процесс упрочнения влияет интегральная температура (а не температура в зоне индивидуальных частиц) и когда она превышает температуру точки АС₃ для стали 50–1058 К. В первом случае температуры в зоне индивидуальных частиц существенно выше (до 3900 К), скорость нарастания ее достигает 10^{10} – 10^{14} К/с, заполнение полем температур объема высоко, величины температурных напряжений не достигают требуемых давлений ($\sigma_{T4\max} = 8 \cdot 10^7$ Н/м², а требуются порядка 10^9 Н/м²), наличие хрома в стали (0,25 %) достаточно для того,

чтобы он выступал как катализатор и обеспечивал ускоренное образование наноструктур. Мы видим, что anomalная микротвердость вероятнее всего связана с образованием наноструктур (рис. 10 б). Достаточно высокую микротвердость в переходном слое можно объяснить частичным образованием наноструктур с размером зерна порядка 100 нм, когда микротвердость снижается.

Во втором случае получается традиционная структура, соответствующая классической структуре закаленной стали 50, а в первом случае (рис. 10, б) появляется белый слой, который не травится и структура не видна на оптическом и растровом микроскопе. Все это еще раз подтверждает реальность получения наноструктур при действии потоков электронов.



б

Рис. 10. Распределение микротвердости по глубине при действии поочередно потоков электронов с энергией 3,2 кэВ ($j = 9,1 \cdot 10^3$ А/м²), с энергией 6,9 кэВ ($j = 10^3$ А/м²) и с энергией 9,9 кэВ ($j = 80$ А/м²) – 1, электронов с энергией 6,9 кэВ ($j = 10^3$ А/м²) – 2 и временем действия 180 мкс и частотой срабатывания 5 Гц; всего 501 импульс (а) и фото микроструктуры продольного разреза образца из стали 50 (б)

Было проведено исследование многократного действия электронного потока с плотностями токов около второй критической $j = 1,1 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$ и энергией 6,9 кэВ. Расчеты показывают, что в этом случае реализуются температуры ниже температуры плавления и в центре пятна, где действуют эти температуры, не реализуется условие для оплавления поверхности (рис. 11 а и б), но в это время реализуются условия для термоупругого разрушения материала в зоне действия температурных напряжений $\sigma_{\max} = 625 \text{ МПа}$, что превышает предел прочности закаленной стали 50 ($\sigma_{\text{в}} = 595 \text{ МПа}$) и при многократном действии потока реализуется термоупругий механизм разрушения материала в зоне действия максимальных по величине температурных напряжений.

Все это подтверждает возможность термоупругого разрушения материала при действии потоков электронов.

В заключении отметим, что теоретически и экспериментально показана возможность получения наноструктур в материалах при действии потоков электронов.

Выводы

1. Экспериментально и теоретически показана возможность образования наноструктур при действии трех потоков электронов с различными энергиями (это приводит к почти полному заполнению объема полями температур и напряжений), тогда как действие одноэнергетичного потока приводит к обычной закалке стали 50.

2. При действии ионов различных сортов, энергий и зарядности и электронов различных энергий возможно реализовать условия для образования наноструктур температуры 500...1500 К, скорости их нарастания большие 10^7 K/c ($10^{10} - 10^{15}$) и в случае ионов реализовать требуемые давления за счет действия температурных напряжений более 10^9 Па , а в случае действия электронов только приблизиться к ним, и самое главное за счет выбора пространственно - временного распределения частиц обеспечить достаточно полное заполнение поверхностного слоя детали полями температур и напряжений, что позволит получать не фрагментарно, а целно в этом объеме наноструктуры.

3. Для эффективного получения температурных напряжений максимальной величины и при хорошем заполнении объема полями напряжений и температур необходимо обеспечить плотности токов ионов и электронов соответствующие первой критической.

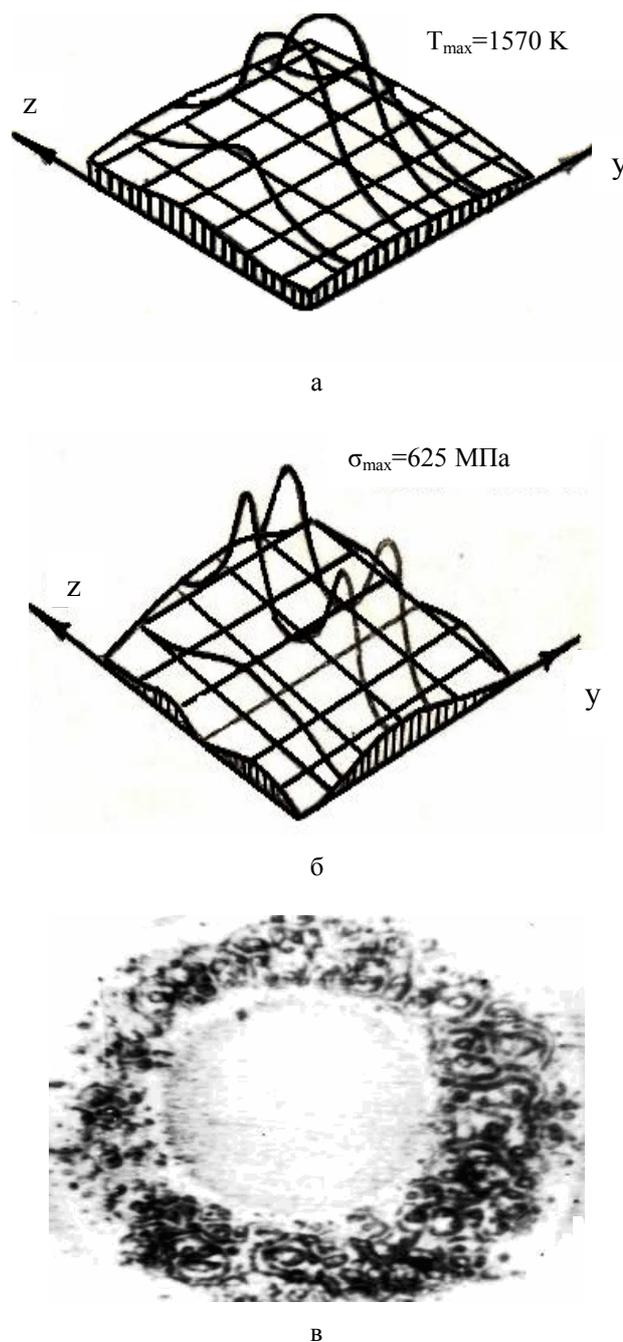


Рис. 11. Распределение температур:
а – температура,
б – температурных напряжений и фотография
зоны разрушения при действии
потока электронов с энергией $E_e = 6,9 \text{ кэВ}$,
и плотностью тока в потоке равной
второй критической $j_{\text{кр}}^2$ на сталь 50 (закаленная),
в – фото следа термоупругого разрушения

4. Необходимо подавать в зону образования наноструктур катализатор если в его составе нет атомов чистых металлов обычно выступающих в роли катализатора.

5. Экспериментально и теоретически показана возможность термоупругого разрушения материала в результате многократного действия потока электронов.

Литература

1. Костюк Г.И. *Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность: учебн. пособ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т "ХАИ", 2009. – 409 с.*

2. Косюк Г.И. *Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения комбинированных технологий: Монография / Г.И. Костюк. – К.: Антиква, 2002. – 1030 с.*

3. Kostyuk G. *The effective cutting tools having the coating and hardened layers: monograph-reference book / G. Kostyuk. – Kharkov, KhAI, 2007. – 633 p.*

4. Гусев А.Н. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии: монография / А.Н. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.*

Поступила в редакцию 12.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии производства авиационных двигателей А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ДІЇ ПОТОКІВ ЧАСТИНОК

Г.І. Костюк, В.М. Павленко, М.Е. Суккарієх, К.П. Ісяк

На основі вирішення сумісної задачі теплопровідності та термопружності одержані поле температур та температурних напружень, які при обумовленому складі по сорту енергії та заряду іонів, або різних енергій електронів та їх густини струму надаються умови для отримання наноструктур. Для випадку дії трьох потоків електронів різної енергії та густини струму експериментально одержані наноструктури та теоретично обґрунтовано їх отримання на сталі 50 з мікротвердістю до 45 ГПа. Все це дозволяє стверджувати про можливість отримання наноструктур при дії електронів.

Ключові слова: наноструктури, поля температур, температурні напруження, іон, електрон.

THE EXPERIMENTAL AND TEORETICAL RESEARCH OF POSIBILITY RECEIVING OF NANOSTRUCTURES AT THE ACTION OF FOLLOWS OF PARTICLES

G.I. Kostyuk, V.N. Pavlenko, M.E. Sukkarieh, K.P. Isiak

On basis of two solution of aprobeew of neat conductivity and of termo elastic the thre – dimensional temperature profiles and temperature pressure with (under sumulteme ation of ions of various grade and energy electron various energy and density of current are calculated reception possibility nanostructures is shown. As result action three follow electrons with various energy and current density experimentally nanostructure and theoretically settee down their receipt on steel with microhardness is 45 GPa. All this allow to give possibility receiving of nanostructures at the action of follows of particles.

Key words: nanostrures, fields of temperatures, temperatures pressure, ion, electron.

Костюк Геннадий Игоревич – д-р техн. наук, зав. кафедрой робототехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Павленко Виталий Николаевич - канд. техн. наук, доцент, проректор по научно-педагогической работе, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Суккарієх Мустафа Эзат – аспирант кафедры робототехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Ісяк Константин Петрович – главный инженер ГП «Завод им. В.А. Малышева», Харьков, Украина.