

## РАЗРАБОТКА НА МАТЕРИАЛИТЕ Е НА ИНЖЕНЕР

Бруйка О.О., Рудяк М.О.  
АДИ при ДонГТУ

### ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Рассмотрено действие потоков электронов разных энергий и плотностей токов на материал и реальность прогноза получения наноструктур. Показано, что существуют физические параметры, при которых реализуются условия для получения наноструктур: требуемые температуры, необходимые скорости нарастания температур и достаточные величины температурных напряжений (давлений).

Рассматривалось действие пяти электронов А с  $E_{eA}=5 \cdot 10^5$  эВ, четырех электронов В с энергией  $E_{eB}=5 \cdot 10^4$  эВ и четырех электронов С с энергией  $E_{eC}=3 \cdot 10^3$  эВ при их действии на деталь из стали. Изучалось распределение температур на глубине детали в зоне действия этих частиц за время столкновений.

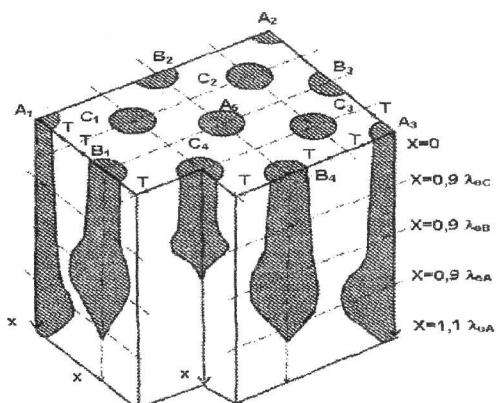
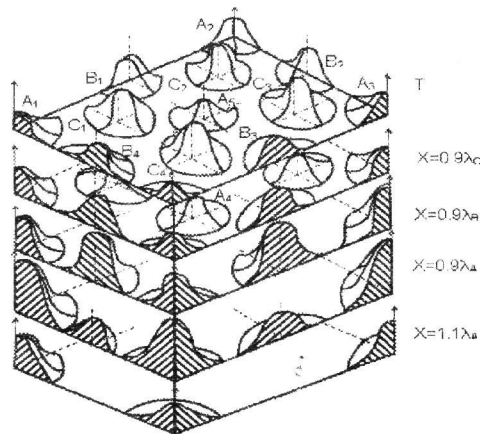


Рис. 1. Распределение температур по глубине при действии 5 электронов А ( $E_{eA} = 5 \cdot 10^4$  эВ), 4 электронов В ( $E_{eA} = 10^4$  эВ), 4 электронов С ( $E_{eA} = 3 \cdot 10^3$  эВ),  $T_{maxA} = 4,2 \cdot 10^4$  К,  $T_{maxB} = 1,3 \cdot 10^4$  К,  $T_{maxC} = 1,83$  К



**Рис. 2. Распределение температур на поверхностях  $x=0$  ( $T_{\max C} = 990$  К),  $x=0,9 \lambda_C$  ( $T_{\max C} = 1,8 \cdot 10^3$  К),  $x=0,9\lambda_B$  ( $T_{\max B} = 1,3 \cdot 10^4$  К),  $x=0,9\lambda_A$  ( $T_{\max A} = 4,2 \cdot 10^4$  К),  $x=1,1\lambda_A$  ( $T_{\max} = 720$  К)**

На рис. 1 показано распределение температур по глубине от действия частиц А, В и С. Видно, что глубина проникновения наиболее высокоэнергетичных электронов составляет порядка  $10^{-6}$  м, что примерно равно  $1,3\lambda_e$ . Максимум температуры реализуется на глубине  $0,9\lambda_e$  и составляет  $4,2 \cdot 10^4$  К, для частицы А максимум температуры также вблизи  $0,9\lambda_e$  и равен  $1,3 \cdot 10^4$  К, а для частицы С максимум составляет  $1,8 \cdot 10^3$  К и находится вблизи  $0,9\lambda_e$ . Поля температур по глубине удачно дополняют друг друга и способствуют заполнению объема полем температур.

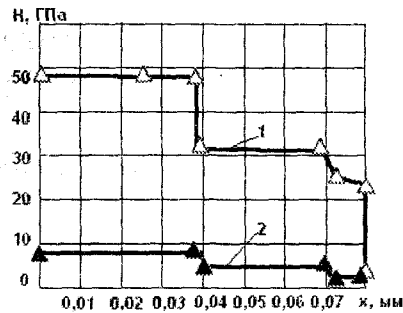
Результаты экспериментального исследования подтверждают возможность получения наноструктур. Так исследовалось одновременное действие электронов различных энергий на сталь 50:

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

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

Потоки электронов подавались с чередованием  $t_y$  действия (временем действия  $t_a = 180$  мкс.) 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/м<sup>2</sup>;  $\sigma_2 = 5,8 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_3 = 8 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>) 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. 3. Видно, что для первого случая (кривые 1, рис. 3) реализуется аномально вы-

сокое значение микротвердости до 50 ГПа, тогда как 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.



**Рис. 3.** Распределение микротвердости по глубине при действии поочередно потоков ионов с энергией 3,2 кэВ ( $j = 9,1 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$ ), с энергией 6,9 кэВ ( $j = 10^3 \text{ А/м}^2$ ) и с энергией 9,9 кэВ ( $j = 80 \text{ А/м}^2$ ) – 1, ионов с энергией 6,9 кэВ ( $j = 10^3 \text{ А/м}^2$ ) – 2 и временем действия 180 мкс и частотой срабатывания 5 Гц.

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.

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

#### Литература:

1. Костюк Г.И., Суккарех Мустафа Еззат, Воляк Е.А. Создание наноструктур в объеме детали при электронно-лучевой обработке // Сборник научных трудов Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов, выпуск 3 (63), 2010, с.8 – 23
2. Костюк Г.И. Монография в двух книгах. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г.И. Костюк. – Х., изд-во АИНУ, 2002. – 1030 с.
3. Kostyuk G.I. Effective coating and modification hardened layers at the cutting tools. Kiev. 2012, 728 p.