

## **Температурные напряжения и скорости деформирования при действии ионов на магниевые сплавы, возможность образования наноструктур**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Исследовано напряженное состояние в зоне действия ионов В<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, С<sup>+</sup>, Al<sup>+</sup>, V<sup>+</sup>, Cr<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, Ni<sup>+</sup>, Zr<sup>+</sup>, Y<sup>+</sup>, Mo<sup>+</sup>, Hf<sup>+</sup>, W<sup>+</sup>, Ta<sup>+</sup>, Pt<sup>+</sup> при действии ионов с зарядом от одного до трех на магниевые сплавы. Получены поля температурных напряжений в зависимости от энергии ионов и заряда. Так, показано, что величины температурных напряжений лежат в пределах от  $10^7$  до  $2,5 \cdot 10^9$  Па, тогда как скорости изменения (деформирования) лежат в пределах от  $10^{18}$  до  $7 \cdot 10^{19}$  Па/с. Показано, что, несмотря на то, что температурных напряжений недостаточно для самостоятельного образования наноструктур, но, учитывая высокую скорость деформирования и достаточные температуры, можно получить наноструктуры в магниевых сплавах.

**Ключевые слова:** температурные напряжения, скорости деформирования, наноструктуры, магниевые сплавы.

### **Введение**

Благодаря высоким удельным физико-механическим характеристикам и малому удельному весу магниевые сплавы широко применяют в авиационной технике, что свидетельствует о необходимости улучшения их свойств, так как современные авиационные конструкции (особенно авиационные двигатели) работают при высоких скоростях и довольно высоких температурах, что выдвигает дополнительные требования к деталям, обеспечивающим работоспособность двигателя. Так, например, лопатки компрессора, особенно первых степеней, испытывают действие микро- и макрочастиц, которые приводят к коррозии, т.е. дополнительно необходимо обеспечивать и высокую эрозионную прочность (стойкость). Для того, чтобы обеспечить эти характеристики, необходимо конструировать материал таким образом, чтобы он имел высокую твердость на поверхности, но в то же время мог деформироваться на большие величины, не испытывая разрушения. Исследования многих авторов показали, что наноструктурные слои имеют пониженный модуль упругости, что позволяет повысить работоспособность деталей, работающих на ударные нагрузки, так как даже при больших перемещениях материала будем иметь относительно невысокие напряжения [1]. Кроме того наноструктуры имеют высокие антикоррозионные свойства, что также подтверждает тезис о необходимости использования наноструктурных слоев для снижения воздействия агрессивных сред [2]. Настоящая работа посвящена исследованию температурных напряжений, а следовательно, и скорости их роста, которые существенно влияют на характер и скорость образования наноструктур.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэро-

космической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

## 1. Состояние вопроса

Для стали и алюминиевых сплавов уже есть некоторые наработки по исследованию действия температурных напряжений в зоне ионов различных энергий и зарядов, которые позволяют оценить вклад температурных напряжений на эффективность получения наноструктур, так как они определяют давление на материал, а следовательно, могут влиять на изменение структуры. В то же время скорость деформирования, а значит, и скорость изменения напряжений будут довольно существенно влиять на получение наноструктур. Всё это свидетельствует о важности проводимых исследований, поскольку они позволяют определить технологические параметры обработки, при которых влияние температурных напряжений и скорости деформирования будут определяющими.

## 2. Постановка задачи

Рассмотрена совместная задача теплопроводности и термоупругости, учитывающая энергию на образование зерна, которая принимаемую несколько большей, чем энергия атомизации зерна, с учетом которой рассчитывают температуры, скорости их нарастания, температурные напряжения и скорости деформирования, объем и размер нанозерна, глубины его залегания, а также число частиц в нанокластере в первом приближении. Затем рассчитывают энергию образования зерна (нанокластера), которую принимают большей или равной энергии атомизации зерна; пересчитывают все исследуемые величины, включая и число частиц в нанокластере; после чего переходят к следующему шагу [2].

В качестве критериев образования наноструктур принимают необходимые температуры (500...1500 К), скорости их нарастания (более  $10^7$  К/с) при этом желательно наличие давлений (температурных напряжений  $10^7$ ... $10^9$  Па), нанокатализатора и достаточное заполнение объема материала наноструктурами (НС).

В дальнейшем рассматривают модель действия индивидуального иона, которая включает в себя:

- баланс тепла в элементарном объеме [3];
- граничные и начальные условия на различных поверхностях [2];
- расчет (предварительный) числа частиц в нанокластере [2];
- расчет энергий образования нанокластера [1].

Расчет повторяют и рассчитывают все основные параметры: число частиц в нанокластере (окончательное), по которому определяют энергию образования зерна, поля температур и диапазон скоростей роста температуры, температурные напряжения и скорости деформирования, объем нанокластера и глубину его залегания, размер зерна.

Рассчитывают температурные напряжения и скоростей их роста.

### 3. Напряженное состояние в зоне действия ионов различных сортов, энергий и зарядов и получение наноструктур в магниевом сплаве

Исследовали зависимости максимальных температурных напряжений, скорости роста максимальной температуры от энергии и заряда ионов. Результаты показаны на рис. 1–9 (а, б) соответственно. Рассматривали действие ионов  $V^+$ ,  $N^+$ ,  $C^+$ ,  $Al^+$ ,  $V^+$ ,  $Cr^+$ ,  $O^+$ ,  $Ni^+$ ,  $Zr^+$ ,  $Mo^+$ ,  $Hf^+$ ,  $W^+$ ,  $Ta^+$ ,  $Pt^+$ . Анализ зависимостей температурных напряжений от энергии ионов для разных зарядов иона  $V^+$  и  $C^+$  показывает, что температурные напряжения с ростом энергии растут. Растут они также при увеличении заряда иона – максимальные значения достигают  $1,63 \cdot 10^7 - 6,33 \cdot 10^8$  и  $1,82 \cdot 10^7 - 7,61 \cdot 10^8$  Па (рис.1, а, б).

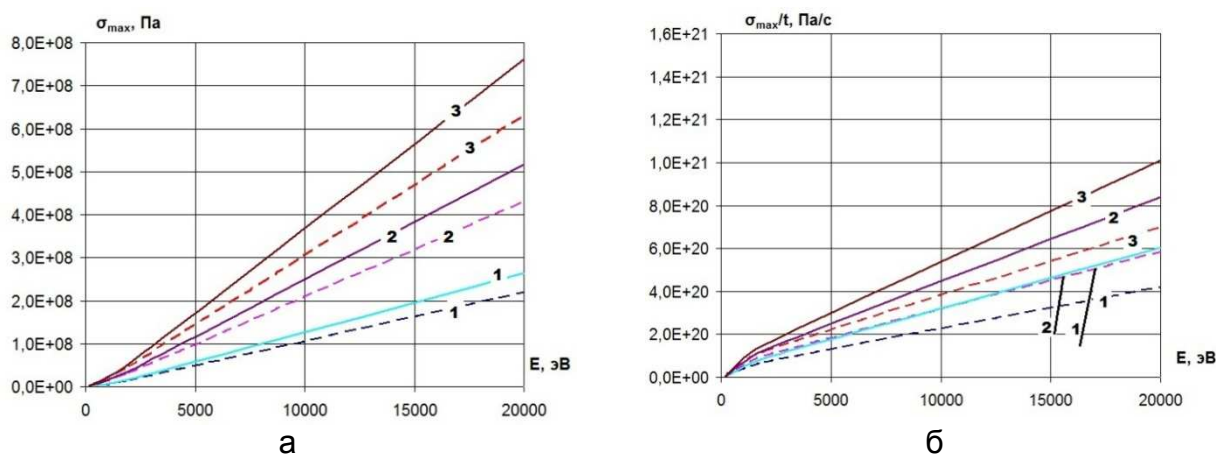


Рис. 1. Зависимости максимальных температурных напряжений (а) и максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов  $V^+$  (---) и  $C^+$  (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

Значения температурных напряжений недостаточны для образования наноструктур путем термоупругого деформирования, но они могут интенсифицировать образование наноструктур под действием температур и высоких скоростей их нарастания. Исследование максимальных скоростей деформирования свидетельствует о том, что высокие скорости деформирования  $2,1 \cdot 10^{19} \dots 4,71 \cdot 10^{19}$  и  $2,16 \cdot 10^{19} \dots 4,77 \cdot 10^{19}$  Па/с могут приводить к образованию наноструктур или существенно ускорять его, а с ростом энергии и заряда эти величины растут.

Аналогичные зависимости для случая действия ионов азота и алюминия на магниевый сплав показаны на рис. 2, а, б. Видно, что характер зависимостей сохранился, но величины максимальных температурных напряжений стали несколько выше  $1,99 \cdot 10^7 \dots 8,9 \cdot 10^8$  и  $2,6 \cdot 10^7 \dots 1,59 \cdot 10^9$  Па. В этом случае высока возможность образования наноструктур под действием температурных напряжений (рис. 2, а), а с учетом высоких скоростей роста напряжений  $2,18 \cdot 10^{19} \dots 5,16 \cdot 10^{19}$  и  $2,31 \cdot 10^{19} \dots 6,05 \cdot 10^{19}$  Па/с (рис. 2, б), наноструктуры будут реализовываться в объеме или обеспечивать ускорение их образования за счет других факторов температуры и высокой скорости её роста.

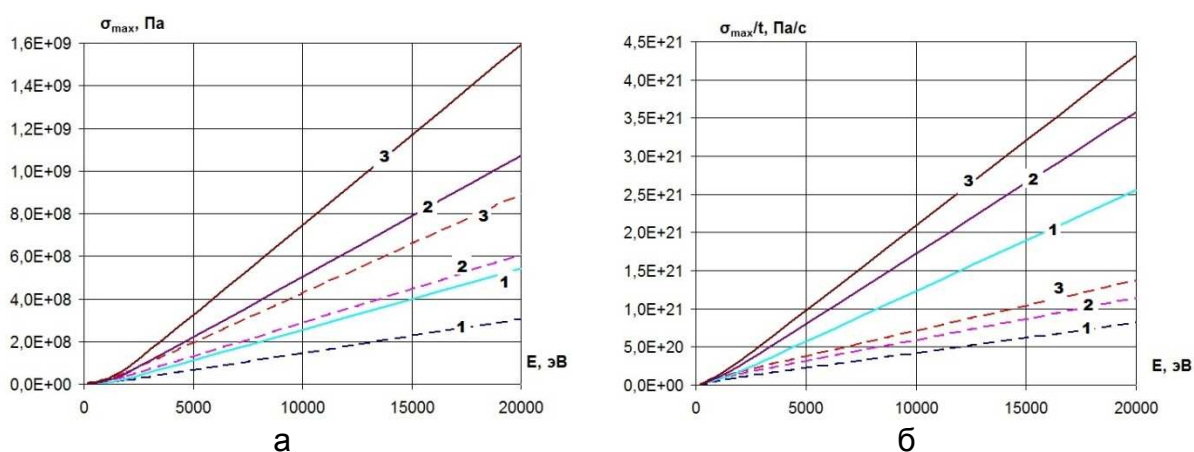


Рис. 2. Зависимости максимальных температурных напряжений (а) и максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов  $N^+$  (---) и  $Al^+$  (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

При действии ионов ванадия и хрома на магниевый сплав характер зависимостей сохранился (рис. 3). Максимальные температурные напряжения достигают величин  $2,88 \cdot 10^7 \dots 2,2 \cdot 10^9$  и  $2,9 \cdot 10^7 \dots 2,26 \cdot 10^9$  Па (рис. 3, а), а максимальные скорости деформирования лежат в пределах  $2,36 \cdot 10^{19} \dots 6,35 \cdot 10^{19}$  и  $2,36 \cdot 10^{19} \dots 6,8 \cdot 10^{19}$  Па (рис. 3, б). В этом случае значения температурных напряжений тоже недостаточны для реализации условий образования наноструктур, но скорости их роста высоки и могут способствовать образованию наноструктур путем реализации требуемых температур и скоростей их роста.

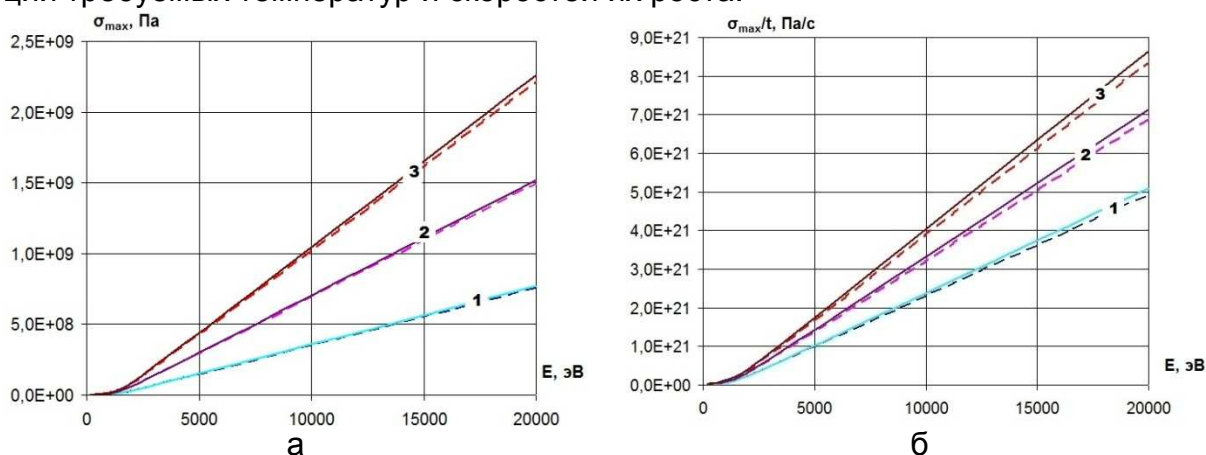


Рис. 3. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов  $V^+$  (---) и  $Cr^+$  (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

При действии ионов кислорода и железа на магниевый сплав характер зависимостей температурных напряжений и скоростей их роста от энергии ионов разных зарядов (1–3) сохранился, наблюдается рост их с ростом энергии ионов и заряда, значения температурных напряжений в области образования наноструктур лежат в пределах  $2,13 \cdot 10^7 \dots 1,02 \cdot 10^9$  и  $2,92 \cdot 10^7 \dots 2,32 \cdot 10^9$  Па соответственно, т.е., для кислорода и железа они растут по сравнению с ванадием и хромом. Скорости роста температурных напряжений лежат в диапазоне  $2,23 \cdot 10^{19} \dots 5,46 \cdot 10^{19}$  Па/с (кислород) и  $2,37 \cdot 10^{19} \dots 7,01 \cdot 10^{19}$  Па/с (железо), т.е. также наблюда-

ется рост температурных напряжений и скоростей деформирования с возрастанием энергии и заряда ионов (рис. 4).

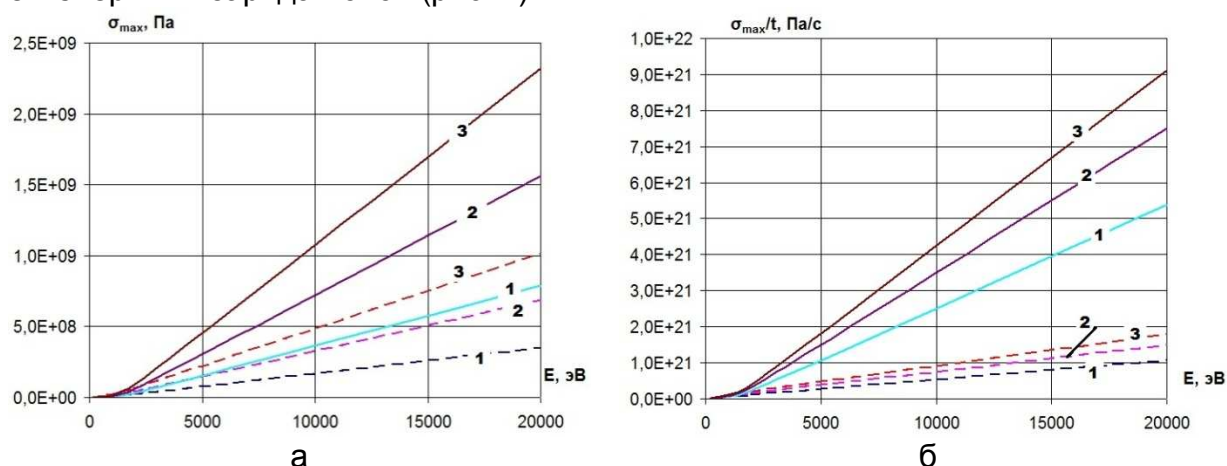


Рис. 4. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов  $O^+$  (---) и  $Fe^+$  (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

Характер кривых для случая действия ионов никеля и кобальта на магниевый сплав сохранился (рис. 5), величины температурных напряжений лежат в диапазоне  $2,94 \cdot 10^7 \dots 2,37 \cdot 10^9$  и  $2,91 \cdot 10^7 \dots 2,34 \cdot 10^9$  Па (рис. 5, а), соответственно скорости деформирования лежат в пределах  $2,36 \cdot 10^{19} \dots 7,14 \cdot 10^{19}$  и  $2,36 \cdot 10^{19} \dots 7,01 \cdot 10^{19}$  Па/с соответственно  $Ni^+$  и  $Co^+$  (рис. 5, б). Следовательно, наблюдается снижение температурных напряжений и скоростей деформирования у ионов кобальта по сравнению с ионами никеля (рис. 6).

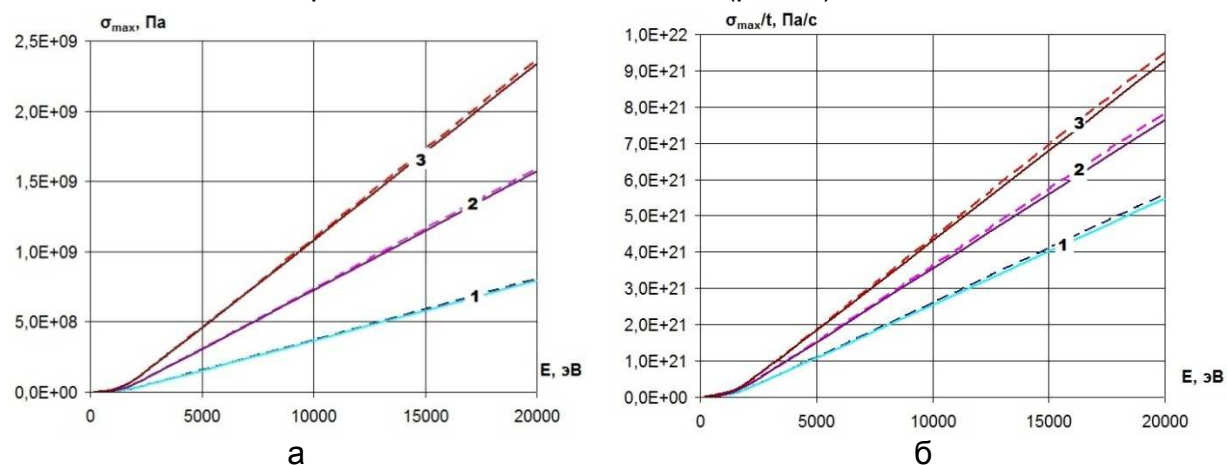


Рис. 5. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов  $Ni^+$  (---) и  $Co^+$  (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

На рис. 6 показаны зависимости максимальных температурных напряжений и скорости их нарастания для случая действия ионов иттрия и циркония. Так, для иттрия диапазон температурных напряжений  $2,85 \cdot 10^7 \dots 2,45 \cdot 10^9$  Па, а для ионов циркония  $2,84 \cdot 10^7 \dots 2,45 \cdot 10^9$  Па, тогда как скорости деформирования для ионов циркония лежат в пределах  $2,35 \cdot 10^{19} \dots 7,09 \cdot 10^{19}$  Па/с. Видно, что максимальные скорости деформирования не существенно отличаются друг от друга для ионов

различных энергий и зарядов, что связано, очевидно, с пропорциональным ростом напряжений и времени действия теплового источника (частицы) – рис. 6, а, б.

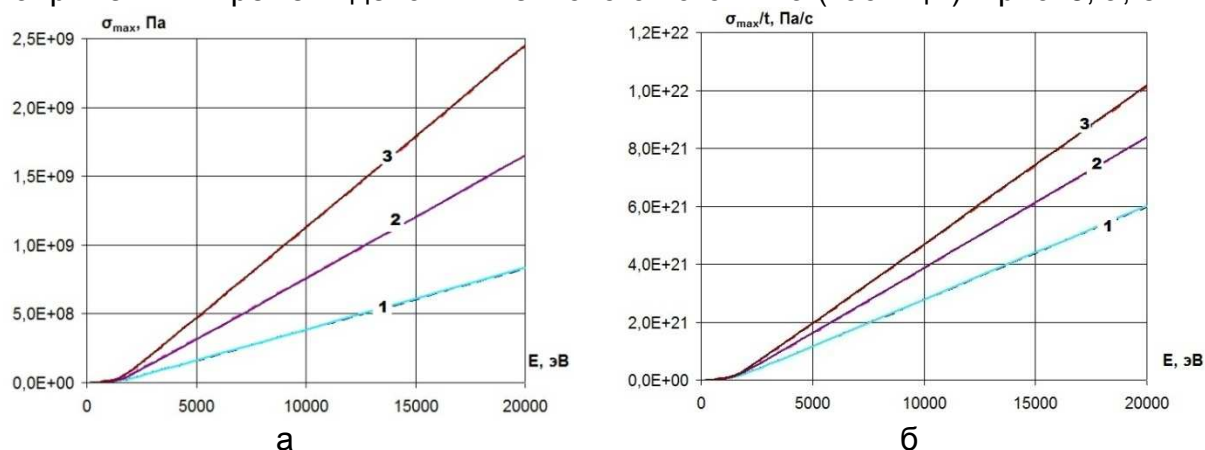


Рис. 6. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов  $Y^+$  (---) и  $Zr^+$  (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

Для ионов молибдена и гафния температурные напряжения реализуются в диапазоне  $2,83 \cdot 10^7 \dots 2,45 \cdot 10^9$  и  $2,51 \cdot 10^7 \dots 2,26 \cdot 10^9$  Па (рис. 7, а), т.е. в этом случае для ионов циркония температурные напряжения при  $2 \cdot 10^3$  эВ больше, чем для действия иона молибдена, тогда как при энергии  $2 \cdot 10^4$  эВ и трехзарядном ионе они больше, скорости деформирования лежат в диапазоне  $2,34 \cdot 10^{19} \dots 7,09 \cdot 10^{19}$  и  $2,3 \cdot 10^{19} \dots 6,53 \cdot 10^{19}$  Па/с. В этом случае скорость деформирования при  $E = 2 \cdot 10^3$  эВ также выше для ионов молибдена, тогда как при  $E = 2 \cdot 10^4$  эВ наоборот – (рис. 7, б).

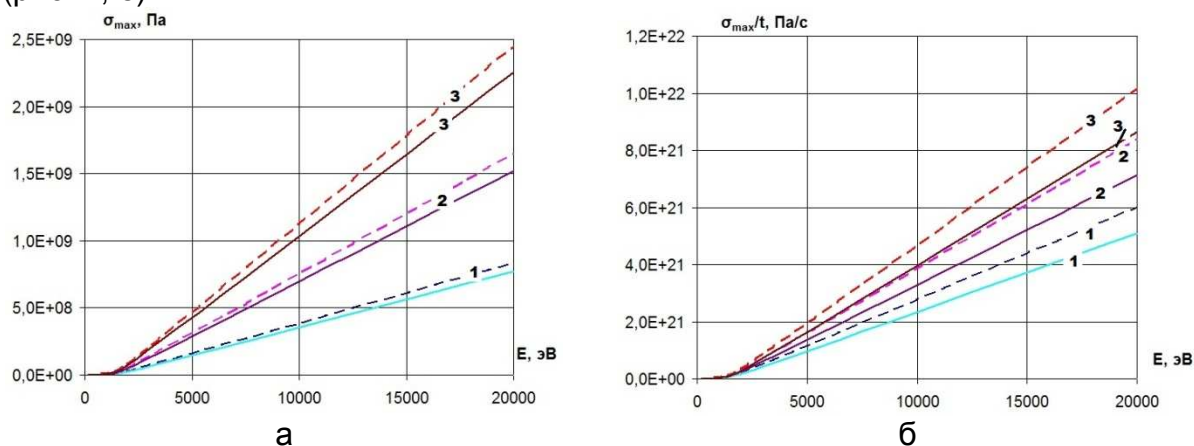


Рис. 7. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов  $Mo^+$  (---) и  $Hf^+$  (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

Анализ аналогичных зависимостей (рис. 8) для ионов тантала и вольфрама показал, что величины напряжений лежат в диапазоне  $2,5 \cdot 10^7 \dots 2,25 \cdot 10^9$  и  $2,49 \cdot 10^7 \dots 2,24 \cdot 10^9$  Па (рис. 8, а), а диапазон скоростей деформирования составляет  $2,29 \cdot 10^{19} \dots 6,51 \cdot 10^{19}$  и  $2,28 \cdot 10^{19} \dots 6,49 \cdot 10^{19}$  Па/с, т.е. наблюдается некоторое уменьшение величин.

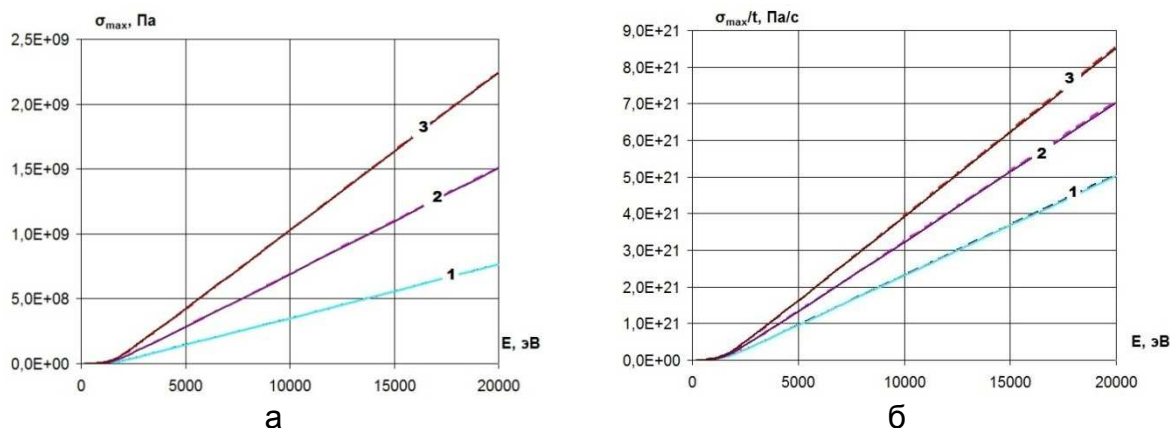


Рис. 8. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов Ta<sup>+</sup>(---) и W<sup>+</sup> (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

Для случая действия ионов платины на магниевый сплав (рис. 9) величины максимальных температурных напряжений лежат в диапазоне  $2,45 \cdot 10^7 \dots 2,21 \cdot 10^9$  Па, т.е. при энергии ионов  $2 \cdot 10^3$  эВ они уменьшались по сравнению с ионом вольфрама; такое же уменьшение наблюдается для энергии  $2 \cdot 10^4$  эВ.

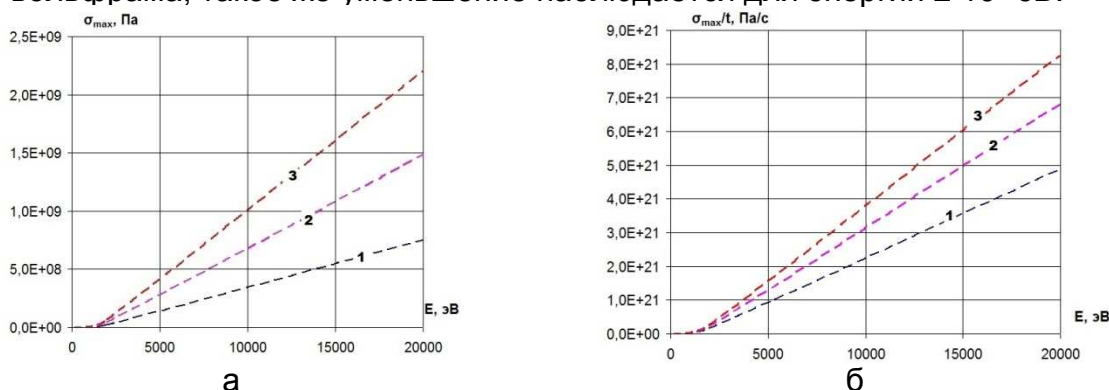


Рис. 9. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов Pt<sup>+</sup>(---) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов)

Видно, что величины максимальных температурных напряжений лежат в диапазоне  $8,49 \cdot 10^8 \dots 2,6 \cdot 10^9$  Па, причем величины их с ростом атомной массы иона в основном растут. Максимальные скорости деформирования реализуются в диапазоне  $2,28 \cdot 10^{19} \dots 6,4 \cdot 10^{19}$  Па/с. Скорости деформирования высоки, и рост их зависит от массы иона, его энергии и заряда, с ростом которых скорость деформирования растет, а размер зоны деформирования уменьшается.

### Выводы

1. Для широкого круга ионов B<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, C<sup>+</sup>, Al<sup>+</sup>, V<sup>+</sup>, Cr<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, Ni<sup>+</sup>, Zr<sup>+</sup>, Mo<sup>+</sup>, Hf<sup>+</sup>, W<sup>+</sup>, Ta<sup>+</sup>, Pt<sup>+</sup> показано, что с ростом энергии и заряда иона величины температурных напряжений и скорости деформирования увеличиваются.
2. Толщина слоя, в котором осуществляется деформирование, уменьшается с ростом массы иона, что приводит к большей концентрации энергии, а потому увеличиваются максимальные значения температурных напряжений и скорости деформирования.

3. Обнаружено, что для следующих пар ионов V–Cr, Ni–Co, Y–Zr, Ta–W реализуются практически одинаковые зависимости температурных напряжений и скоростей их деформирования от энергии и заряда иона, что позволяет заменять один ион другим, минимизируя стоимость получения наноструктур.

4. Высокие скорости деформирования, очевидно, могут приводить к образованию наноструктур, а также способствовать ускорению их образования под действием температур и высоких скоростей их роста.

### Список литературы

1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
2. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
3. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.
4. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
5. Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
6. Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
7. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
8. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
9. Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.
10. Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
11. Шнейдер, П. Инженерные проблемы теплопроводности [Текст] / П. Шнейдер. – М.: Иностран. лит., 1960. – 488 с.
12. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
13. Хаякава, С. Ядерно-физический аспект: в 2 кн. [Текст] / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с.
14. Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с.



15. Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.
16. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
17. Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.
18. Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.
19. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. –2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.
20. Коваленко, В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы [Текст] / В.Ф. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1976. – 216 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф., декан А.И. Долматов Национального аэрокосмического университета «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, Харьков  
Поступила в редакцию 05.09.2014

### **Температурні напруження і швидкості деформування при дії іонів на магнієві сплави, можливість створення наноструктур**

Досліджено напружений стан у зоні дії іонів В+, N+, С+, Al+, V+, Cr+, O+, Ni+, Zr+, Y+, Mo+, Hf+, W+, Ta+, Pt+ при дії іонів із зарядом від одного до трьох на магнієві сплави. Отримано поля температурних напружень залежно від енергії іонів і заряду. Так, показано, що величини температурних напружень лежать у межах від  $10^7$  до  $2,5 \cdot 10^9$  Па, тоді як швидкості зміни (деформування) лежать у межах від  $10^{18}$  до  $7 \cdot 10^{19}$  Па/с. Показано, що, незважаючи на те, що температурних напружень недостатньо для самостійного утворення наноструктур, але, враховуючи високу швидкість деформування і достатні температури, можна отримати наноструктури в магнієвих сплавах.

**Ключові слова:** температурні напруження, швидкості деформування, наноструктури, магнієві сплави.

### **Temperature and strain rate deformation under the action of ions on magnesium alloys ability to create nanostructures**

Investigated the stress state in the area of ion B+, N+, C+, Al+, V+, Cr+, O+, Ni+, Zr+, Y+, Mo+, Hf+, W+, Ta+, Pt+ by the action of ions with a charge from one to three magnesium alloys. Retrieved thermal stress fields, depending on the energy of ions and charge. Thus it is shown that thermal stress values range from  $10^7$  to  $2,5 \cdot 10^9$  Pa, while the rate of change (deformation) shall lie in horror from  $10^{18}$  to  $7 \cdot 10^{19}$  Pa/s. It is shown that, despite the fact that the thermal stresses in-sufficient for self-education of nanostructures, but considering you juice-speed deformation and sufficient temperature can be obtained nanostructures in magnesium alloys.

**Keywords:** thermal stress, deformation rate, nanostructures, magnesium alloys.