

Температуры и температурные напряжения при действии ионов на твердый сплав Т15К6 и реализация наноструктур

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Исследовано влияние энергии иона, его заряда и сорта на величину максимальных температур, максимальных и минимальных температурных напряжений в зоне действия ионов различных сортов (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Y^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+). Показано, что максимальные температуры и температурные напряжения реализуются для легких ионов: бор, углерод, азот, тогда как минимальные значения реализуются для тяжелых ионов: гафний, тантал, вольфрам, платина. Показано определяющее влияние энергии иона и его заряда на величины температур и температурных напряжений.

Ключевые слова: температуры, температурные напряжения, твердый сплав, ионы, наноструктуры.

Введение

Использование твердого сплава Т15К6 в качестве режущего инструмента показало, что его эффективная работа зависит от ряда факторов: наличия покрытия, размер зерна которого меньше, чем размер зерна основного материала, и получения твердого сплава с существенно уменьшенным размером зерна, приближающимся к наноструктурам или же субмикроструктурам. Как показано ранее в работах [1–18], наноструктуры имеют улучшенные физико-механические характеристики, в частности, повышенную микротвердость (что повышает износостойкость РИ), пониженный модуль упругости, который приводит к повышению работоспособности РИ при действии ударных нагрузок (черновое точение или точение с ударами, связанными с геометрией детали), повышенный предел прочности и предел текучести (они обеспечивают снижение вероятности скола под действием суммарных напряжений). К сожалению, до настоящего времени существует незначительное число работ, где исследованы теоретические аспекты выбора технологических параметров потоков ионов, которые могут быть выбраны исходя из критериев получения наноструктур: температуры должны лежать в пределах 500...1500 К, скорость их нарастания – больше 10^7 К/с и наличие температурных напряжений в диапазоне 10^7 ... 10^9 Па.

Всё это свидетельствует о том, что исследование температур и температурных напряжений в зоне действия ионов актуально для оценки возможности получения наноструктур.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и 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 аэрокосмической 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», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и

РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

1. Состояние вопроса

Существует достаточно много работ [3–10], посвященных исследованию размера зерна наноструктуры, что весьма оправдано, так как размер зерна наноструктуры влияет на её физико-механические характеристики. Так, например, наблюдалось влияние на микротвердость, предел усталости, предел текучести, коэффициент трения, что еще раз подтверждает необходимость прогнозирования размера зерна. Моделей, которые бы прогнозировали размер зерна, небольшое число [1, 2], но в них не учтена энергия на кристаллизацию при образовании зерна наноструктуры. Поэтому мы использовали новую модель, которая учитывала практически все взаимосвязи крайних атомов не только в зерне, но и в объеме наноструктуры, для чего отдельно рассчитывали число частиц в нанокластере, а потом рассматривали их взаимодействие с остальными зернами. Такая модель позволяет обеспечить в энергетическом плане более точное определение энергии на повышение температуры и температурные напряжения.

Целью данной статьи является исследование влияния технологических параметров потоков ионов различной энергии, сорта и заряда на величину максимальных температур, скоростей их нарастания и температурные напряжения. Это позволит оценить возможность получения наноструктур в объеме инструментального материала.

В настоящее время значительное число работ посвящено исследованию возможности получения наноструктур [1–18], основной объем работ выполнен по проведению эксперимента [11–18], теоретических же работ в этом плане очень мало [1–2]. Всё это не позволяет прогнозировать технологические параметры потоков ионов для получения наноструктур в различных инструментальных материалах, что свидетельствует об актуальности и важности исследования.

Так как благодаря экспериментальным работам удалось оценить диапазон температур, скоростей их нарастания и величин температурных напряжений, которые необходимы для получения наноструктур, то критериями получения наноструктур примем такие: диапазон температур 500–1500 К, скорость нарастания температуры – более 10^7 К/с и для ускорения получения наноструктур необходимо действие напряжений в диапазоне от 10^7 до 10^9 Па (для получения наноструктур за счет действия напряжений возможно при напряжениях, равных или больших 10^{10}).

Материалы исследований получены на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия индивидуального иона. Решение проведено численным методом МКЕ, определены поля температур и температурных напряжений, что позволяет оценить реальность получения наноструктур.

Результаты исследований

Для широкого круга ионов (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+), действующих на твердый сплав Т15К6, получены зависимости максимальной температуры, максимальных и минимальных температурных напряжений от энергии ионов с различными зарядами ($Z = 1$; $Z = 2$; $Z = 3$), действующих на твердый сплав Т15К6.

Так, для случая действия ионов бора, углерода и азота такие зависимости показаны на рис. 1, а, 2, а, 3, а.

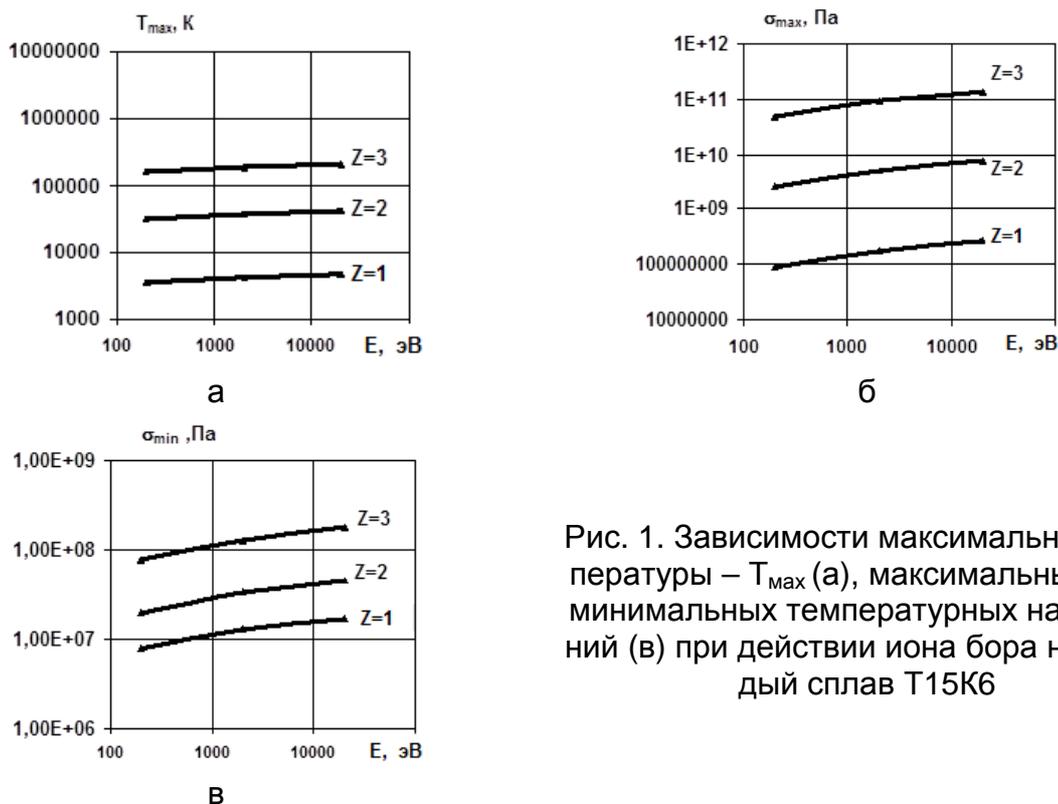


Рис. 1. Зависимости максимальной температуры – T_{\max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона бора на твердый сплав Т15К6

Видно, что температуры (рис. 1, а) существенно возрастают с ростом энергии и достигают температур $2,13 \cdot 10^5$ К при действии ионов бора ($Z = 3$), тогда как для ионов углерода эти величины значительно меньше – порядка $2,66 \cdot 10^5$ К (рис. 2, а), а для ионов азота составляют величину $3,1 \cdot 10^5$ К (рис. 3, а). Уменьшение заряда приводит к существенному снижению температур, и они достигают $1,62 \cdot 10^5$ К в случае действия иона бора, $2,02 \cdot 10^5$ К – при действии ионов углерода и $2,4 \cdot 10^5$ К – при действии ионов азота. Видно, что рост массы иона приводит к повышению температур. Температурные напряжения с ростом величины энергии растут. Максимальные температурные напряжения сначала плавно возрастают, а затем их скорость роста увеличивается и достигает постоянной стационарной. Максимальные температурные напряжения для ионов бора достигают величин $1,38 \cdot 10^{11}$ Па ($Z = 3$), энергии $2 \cdot 10^4$ эВ, а для ионов углерода они больше $1,61 \cdot 10^{11}$ Па для тех же условий, для ионов азота – $1,82 \cdot 10^{11}$ Па (рис. 1, б, 2, б, 3, б). Видно, что в этом случае величины напряжений достаточны для непосредственного образования наноструктур, что еще раз подтверждает необходимость исследования температурных напряжений в зоне действия ионов. Уменьшение заряда ($Z = 1$) приводит к снижению температурных напряжений до $4,8 \cdot 10^{10}$ Па (B^+), $5,6 \cdot 10^{10}$ Па (C^+) и $6,35 \cdot 10^{10}$ Па (N^+). При малых энергиях иона величины напряжений снижаются практически на несколько порядков, хотя для азота они несколько выше, чем для бора (рис. 1, 2, 3). Для минимальных температурных напряжений зависимости по характеру практически похожи на зависимость температуры от энергии ионов, т.е. сначала наблюдается быстрый рост, а затем – практически линейная зависимость от энергии. Величины минимальных температурных напряжений снизились более чем на порядок (рис. 1, в). Снижение величины заряда иона приводит к уменьшению минимальных температурных напряжений, но

характер зависимостей сохраняется.

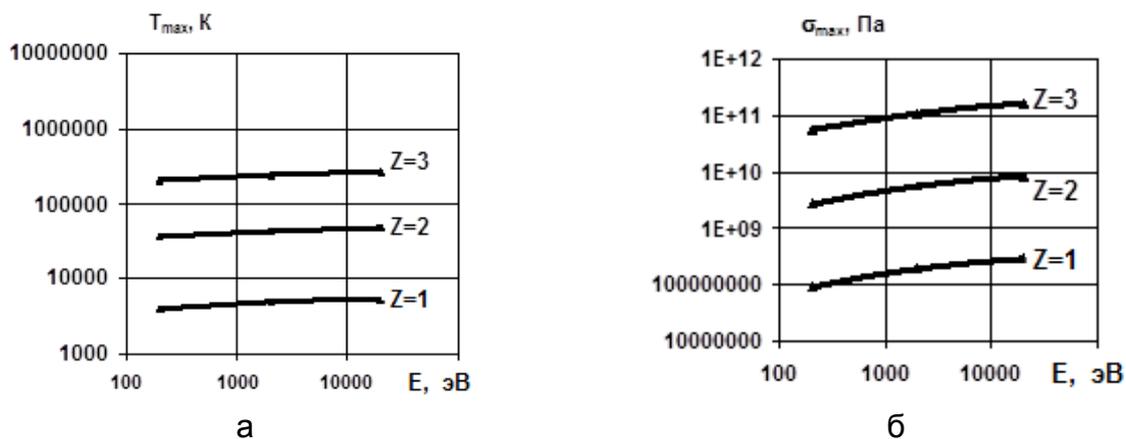


Рис. 2. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона углерода на твердый сплав Т15К6

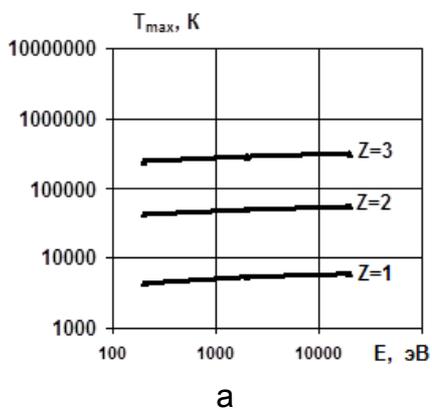
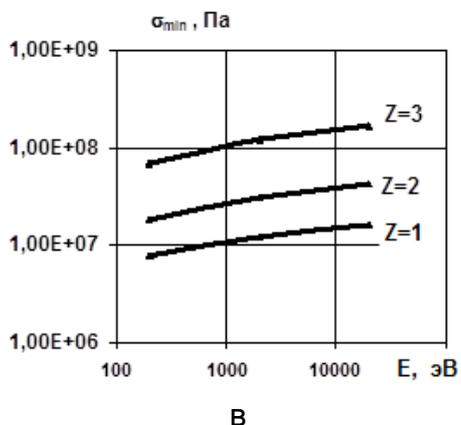


Рис. 3. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона азота на твердый сплав Т15К6

Для малых значений энергии ($E_i = 200$ эВ) минимальные значения напряжений

становятся менее чем 10^7 Па. Исследование температурных напряжений показало: температурные напряжения по величине недостаточны для образования наноструктур (200...2000 эВ), а для 20 кэВ вполне реально получать наноструктуры вследствие действия температурных напряжений. Для малых энергий температурные напряжения могут существенно ускорить этот процесс при соответствующих температурах (500...1500 К). Результаты исследования скорости роста температуры выявлено, что практически для всех исследованных режимов она превышает 10^7 К/с.

Аналогичные зависимости для случая действия ионов алюминия, ванадия и хрома на твердый сплав Т15К6 показали (рис. 4, 5, 6), что максимальные температуры практически сохраняются и находятся вблизи $8,75 \cdot 10^5$ К. Снижение же заряда до $Z = 1$ приводит к снижению температур до $6,65 \cdot 10^5$ К, и они сохраняются (рис. 4, а, 5, а, 6, а). Максимальные температурные напряжения плавно растут при малых энергиях, а при больших наблюдается практически линейная зависимость напряжений от энергии ионов, причем для случая действия иона алюминия они несколько выше, чем для ионов ванадия и хрома, и достигают значений $4,59...3,31 \cdot 10^{11}$ Па. Видно, что с ростом массы металлического иона величины напряжений снижаются, но они достаточны для самостоятельного образования наноструктур, даже при заряде $Z = 1$. При малых энергиях ионов эти напряжения – порядка 10^7 Па (рис. 2, б). Для минимальных температурных напряжений, как и в предыдущем случае, значения напряжений для случая действия ионов алюминия несколько выше, чем для ионов ванадия и хрома, а их максимальные значения достигают $1,43 \cdot 10^7...4,39 \cdot 10^7$ и $2,01 \cdot 10^7$ Па, при минимальных энергиях их значения также незначительны и лежат в диапазоне $1,3 \cdot 10^8...1,04 \cdot 10^8$ Па. Минимальные значения соответствуют ионам хрома.

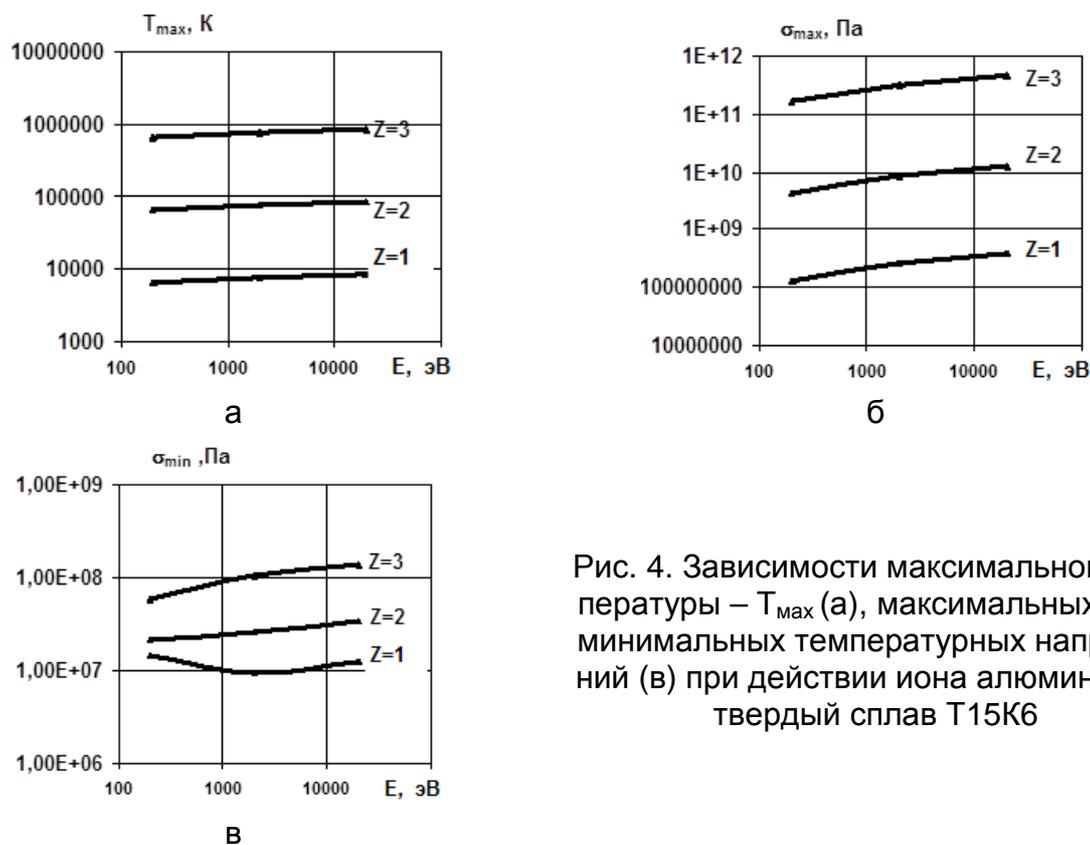


Рис. 4. Зависимости максимальной температуры – T_{\max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона алюминия на твердый сплав Т15К6

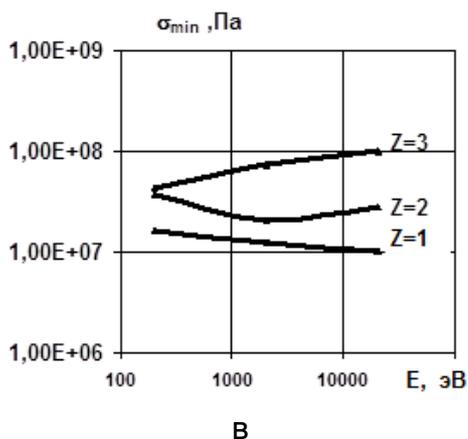
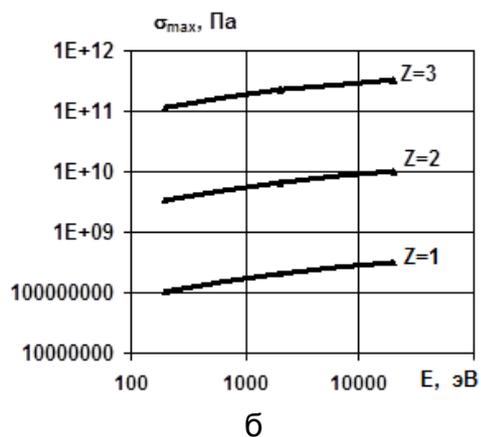
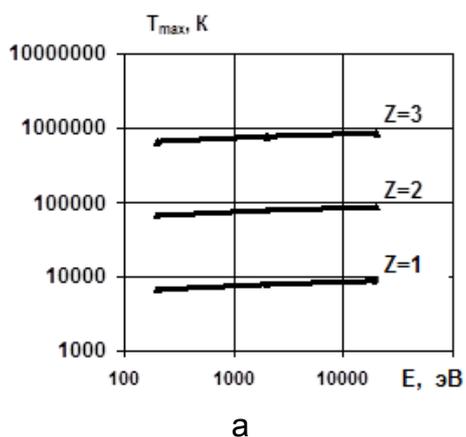


Рис. 5. Зависимости максимальной температуры – T_{\max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона ванадия на твердый сплав T15K6

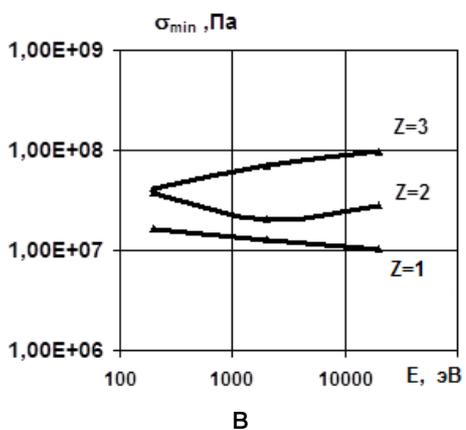
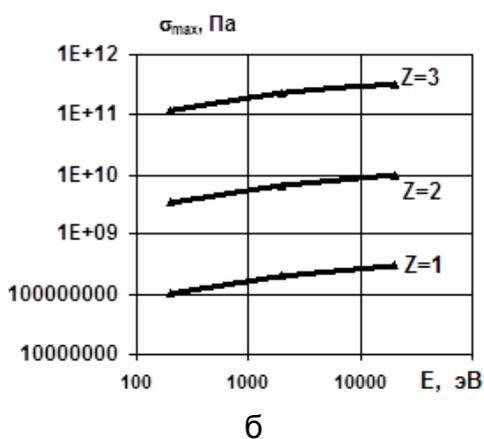
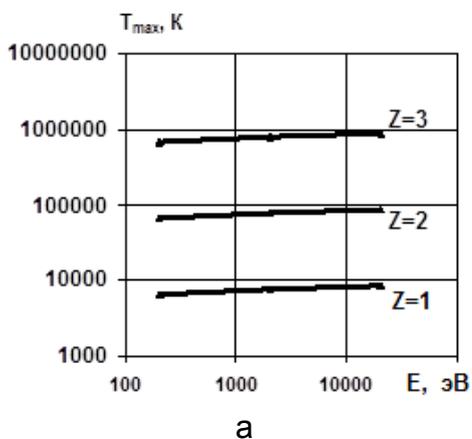


Рис. 6. Зависимости максимальной температуры – T_{\max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона хрома на твердый сплав T15K6

Переход к кислороду приводит к росту максимальных температурных напряжений до $2,7 \cdot 10^{11}$ Па ($Z = 3$) и $2,2 \cdot 10^{11}$ Па ($Z = 1$), что подтверждает тезис о возможности реализации наноструктур при действии температурных напряжений. Минимальные значения температурных напряжений лежат в пределах от $1,2 \cdot 10^7 \dots 2,02 \cdot 10^8$ Па (рис. 7).

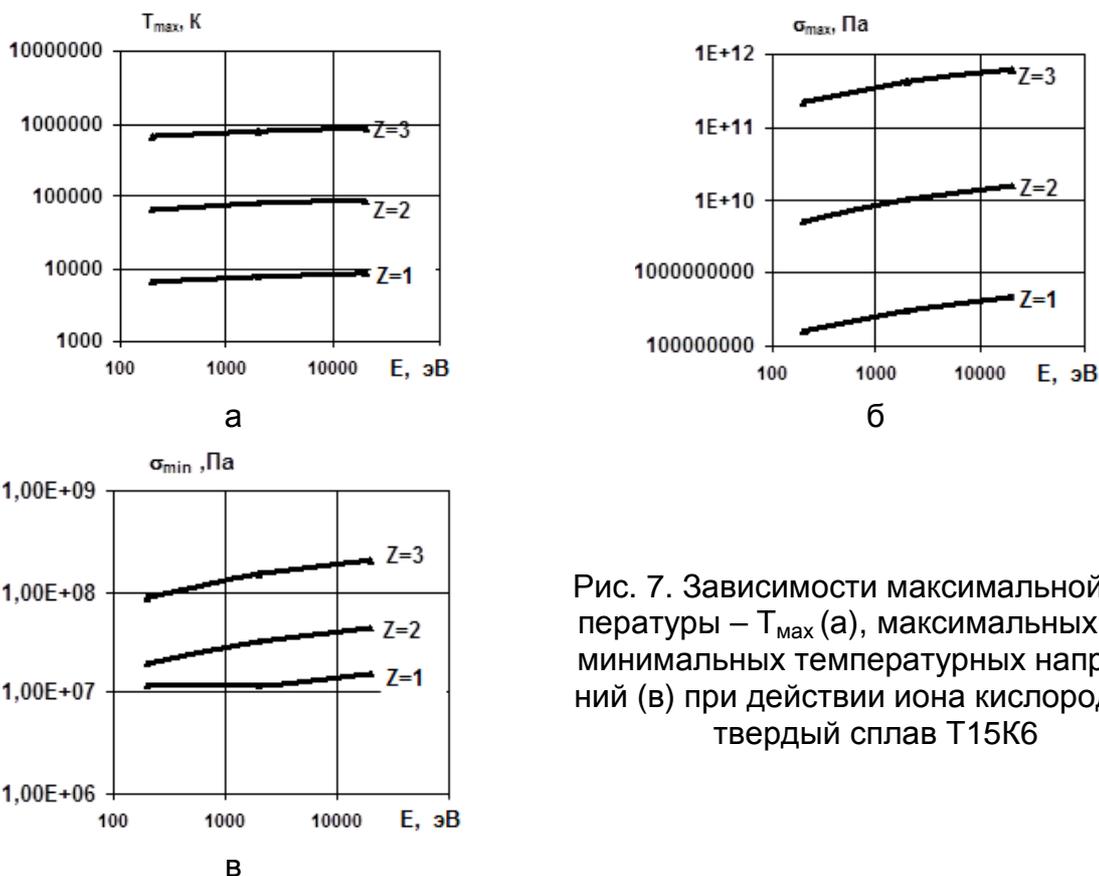


Рис. 7. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона кислорода на твердый сплав Т15К6

Для ионов железа, никеля и кобальта максимальные температуры остаются практически одинаковыми и составляют $8,75 \cdot 10^5$ К, а минимальные при этой же энергии – $6,65 \cdot 10^5$ К. При малых энергиях температуры снижаются до $6,65 \cdot 10^3$ К (рис. 8, а, 9, а, 10, а). Максимальные температурные напряжения для железа, никеля и кобальта последовательно снижаются от $2,3 \cdot 10^{11}$ до $3,1 \cdot 10^{11}$ Па, т.е. практически также остаются постоянными (рис. 8, б, 9, б, 10, б). Минимальные напряжения не превышают $9,34 \cdot 10^7$ Па (рис. 8, в, 9, в, 10, в).

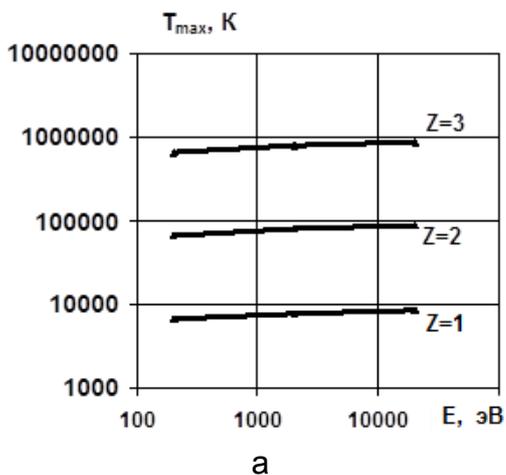
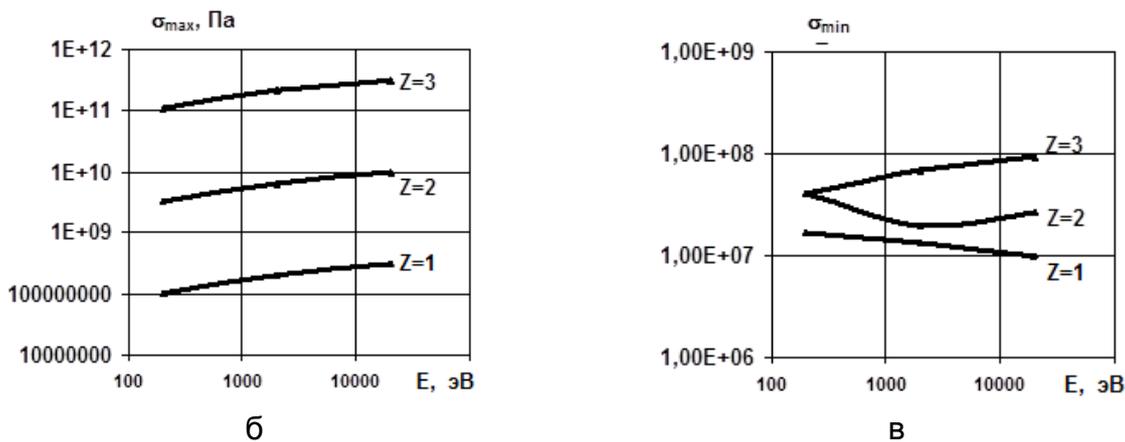


Рис. 8. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона железа на твердый сплав Т15К6



Окончание рис. 8

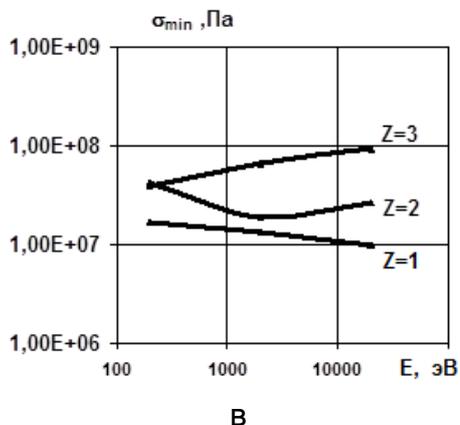
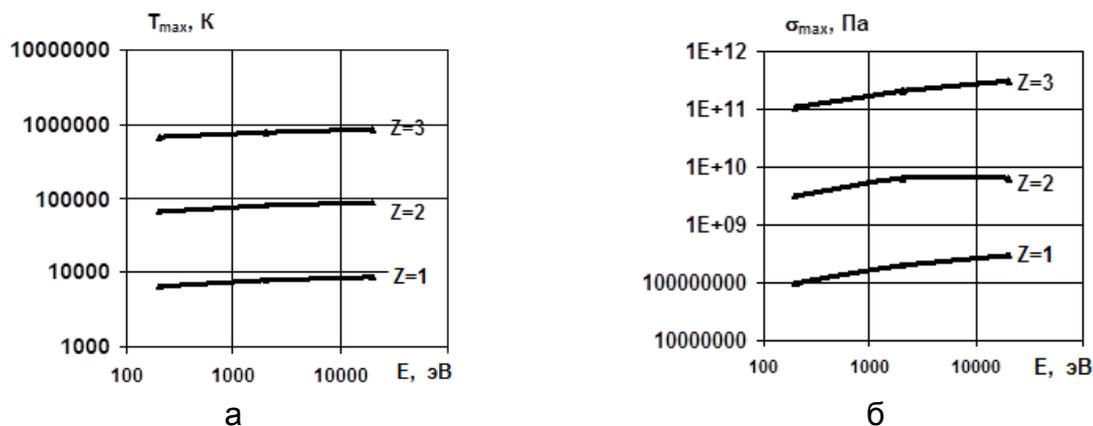


Рис. 9. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона никеля на твердый сплав Т15К6

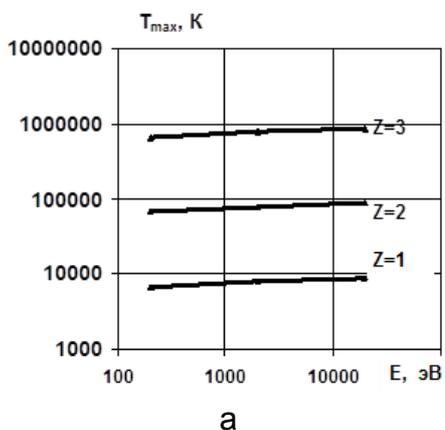
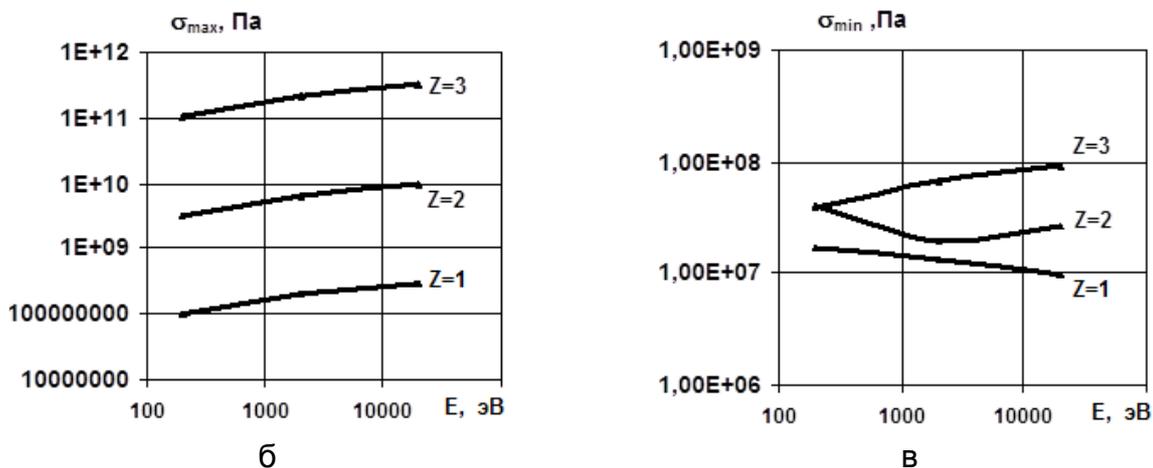


Рис. 10. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона кобальта на твердый сплав Т15К6



Окончание рис. 10

Аналогичные зависимости для ионов иттрия, циркония и молибдена показаны на рис. 11, 12, 13. Максимальные температурные напряжения снижаются при переходе от иттрия к цирконю и молибдену и лежат в диапазоне $2,79 \cdot 10^{11} \dots 2,74 \cdot 10^{11}$ Па. В этом случае максимальные температуры практически сохраняются – $8,75 \cdot 10^5$ К ($Z = 3$) и $6,65 \cdot 10^5$ К ($Z = 1$) (рис. 11, а, 12, а, 13, а). Минимальные напряжения для этих энергий ($2 \cdot 10^4$ эВ) лежат вблизи $8 \cdot 10^7$ Па (рис. 11, в, 12, в, 13, в).

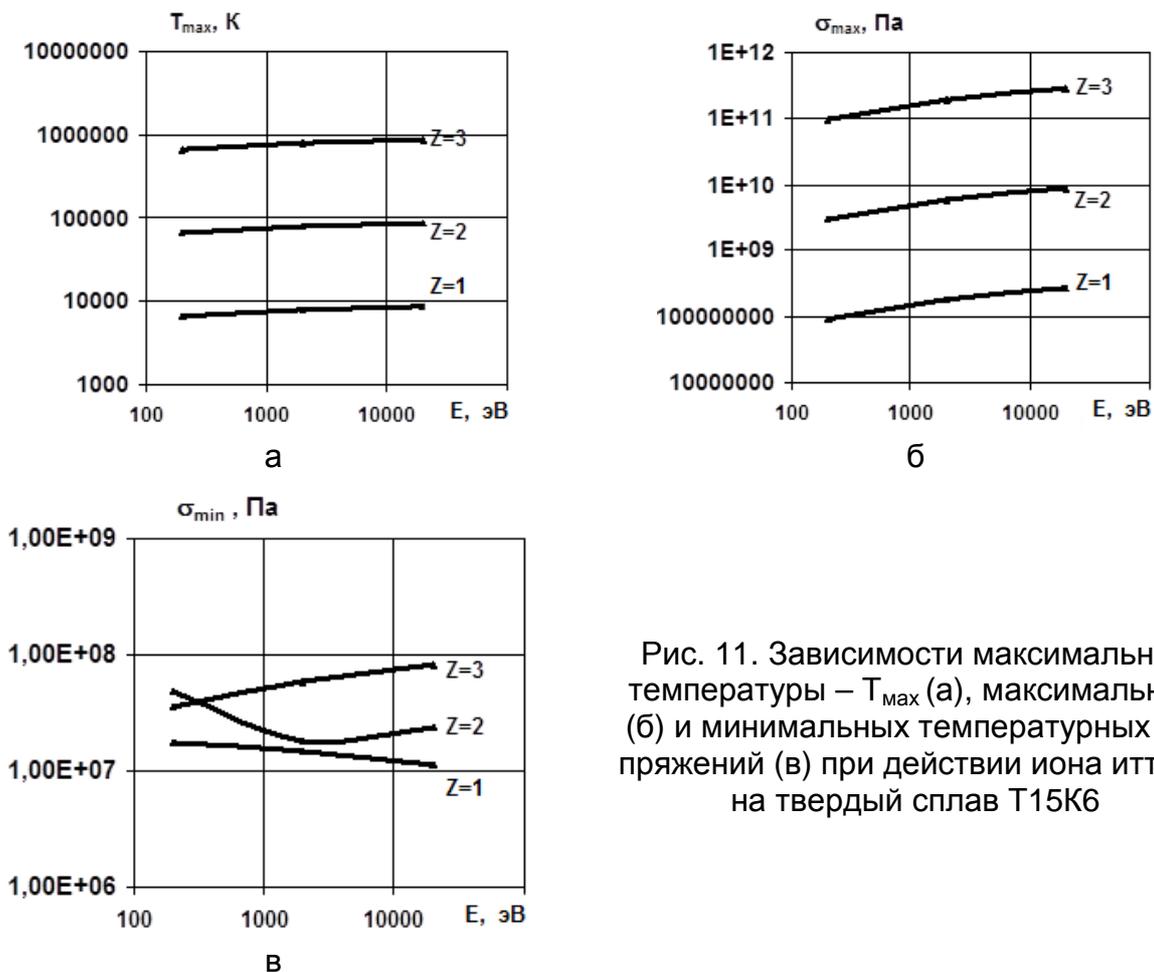


Рис. 11. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона иттрия на твердый сплав Т15К6

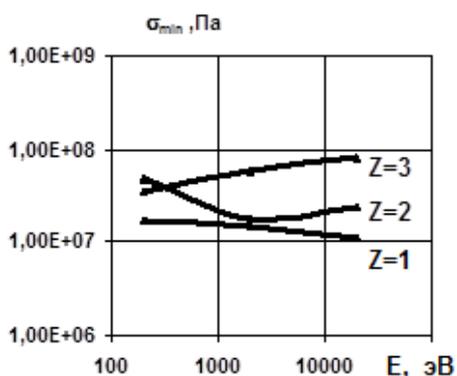
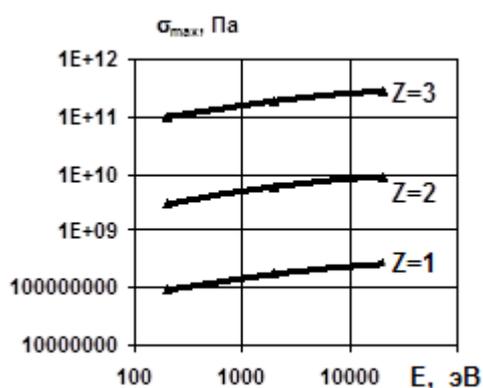
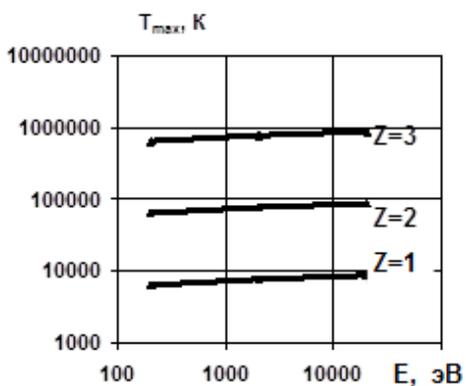


Рис. 12. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона циркония на твердый сплав Т15К6

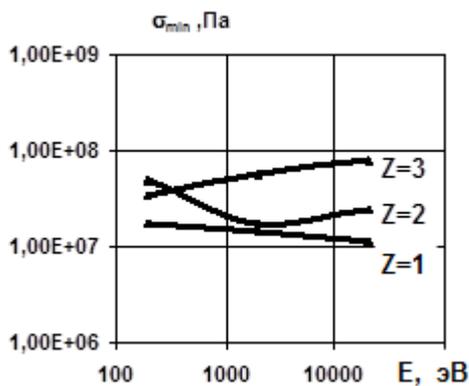
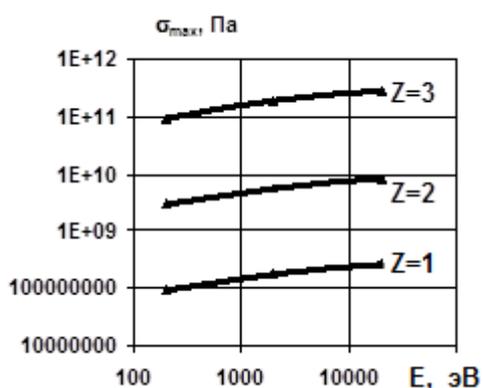
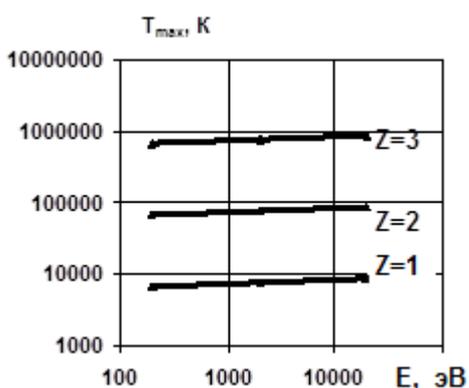
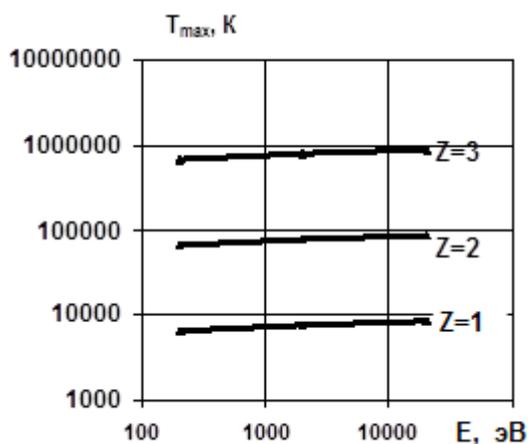
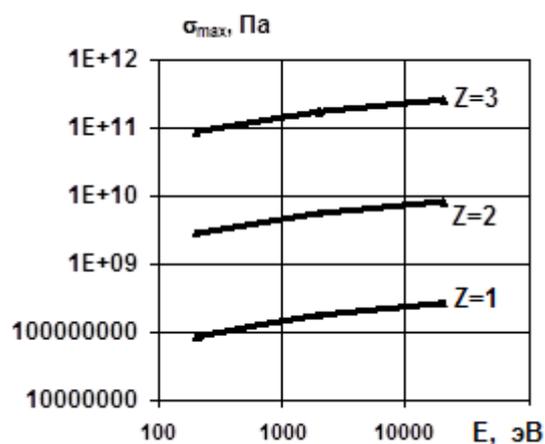


Рис. 13. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона молибдена на твердый сплав Т15К6

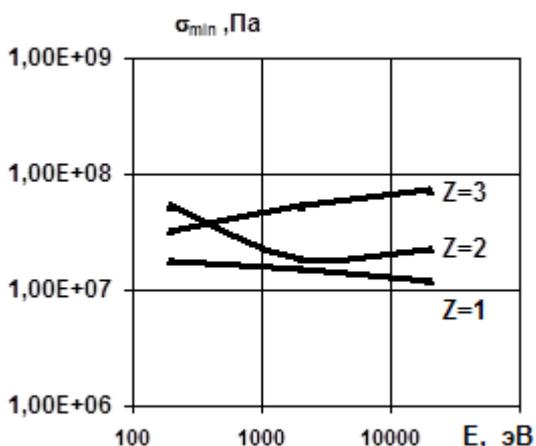
Переход к ионам гафния, тантала и вольфрама не приводит к изменению максимальных температур (14, а, 14, а, 16, а), тогда как температурные напряжения практически также сохраняются – максимальные составляют $2,58 \cdot 10^{11}$ Па, а минимальные – $8,81 \cdot 10^{10}$ Па. Минимальные значения напряжений лежат в диапазоне $3,21 \dots 7,51 \cdot 10^7$ Па (14, в, 15, в, 16, в).



а

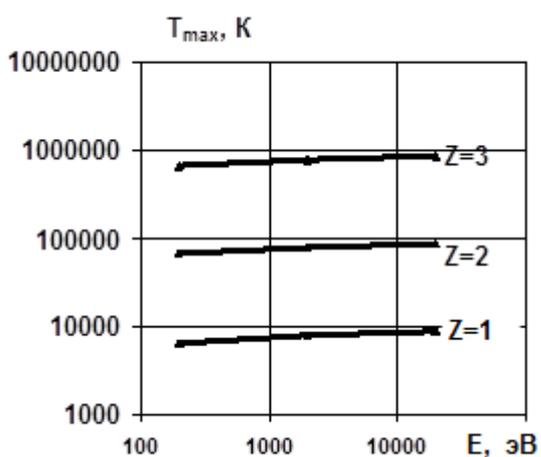


б



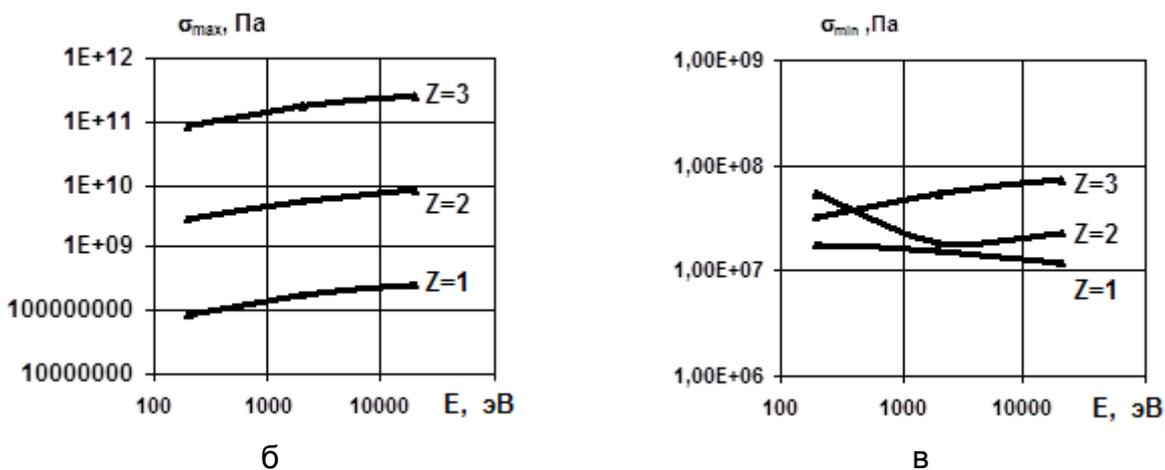
в

Рис. 14. Зависимости максимальной температуры – T_{\max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона гафния на твердый сплав Т15К6



а

Рис. 15. Зависимости максимальной температуры – T_{\max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона тантала на твердый сплав Т15К6



Окончание рис. 15

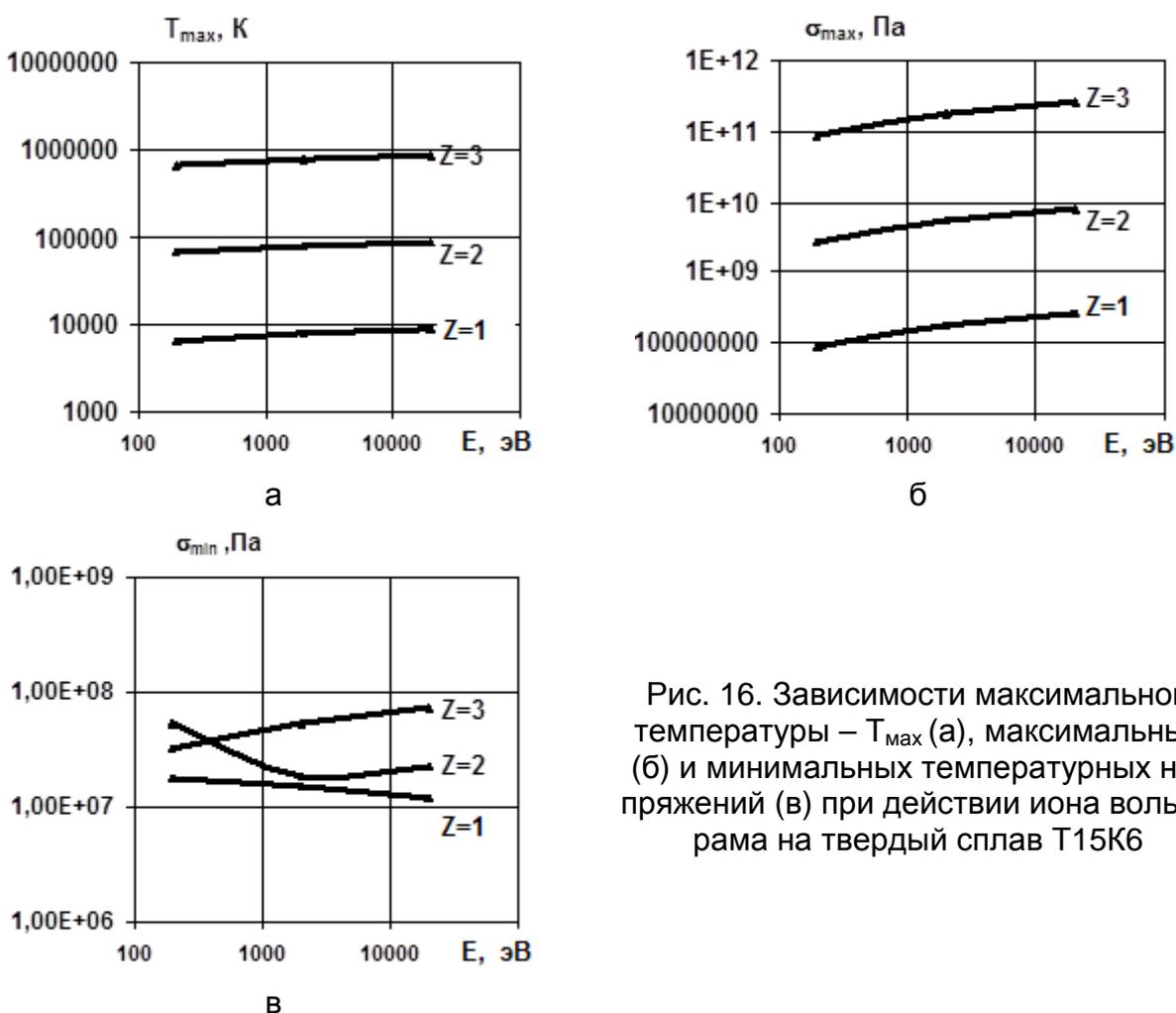


Рис. 16. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона вольфрама на твердый сплав Т15К6

Аналогичные зависимости для ионов платины показаны на рис. 17. В этом случае температуры практически сохранились, и температурные напряжения также составляют $2,58 \cdot 10^{11}$ Па ($Z = 3$), минимальные – $8,81 \cdot 10^{10}$ Па ($Z = 1$) (рис. 17, б). Минимальные же значения напряжений лежат в диапазоне от $1,78 \cdot 10^7$ до $7,49 \cdot 10^7$ Па.

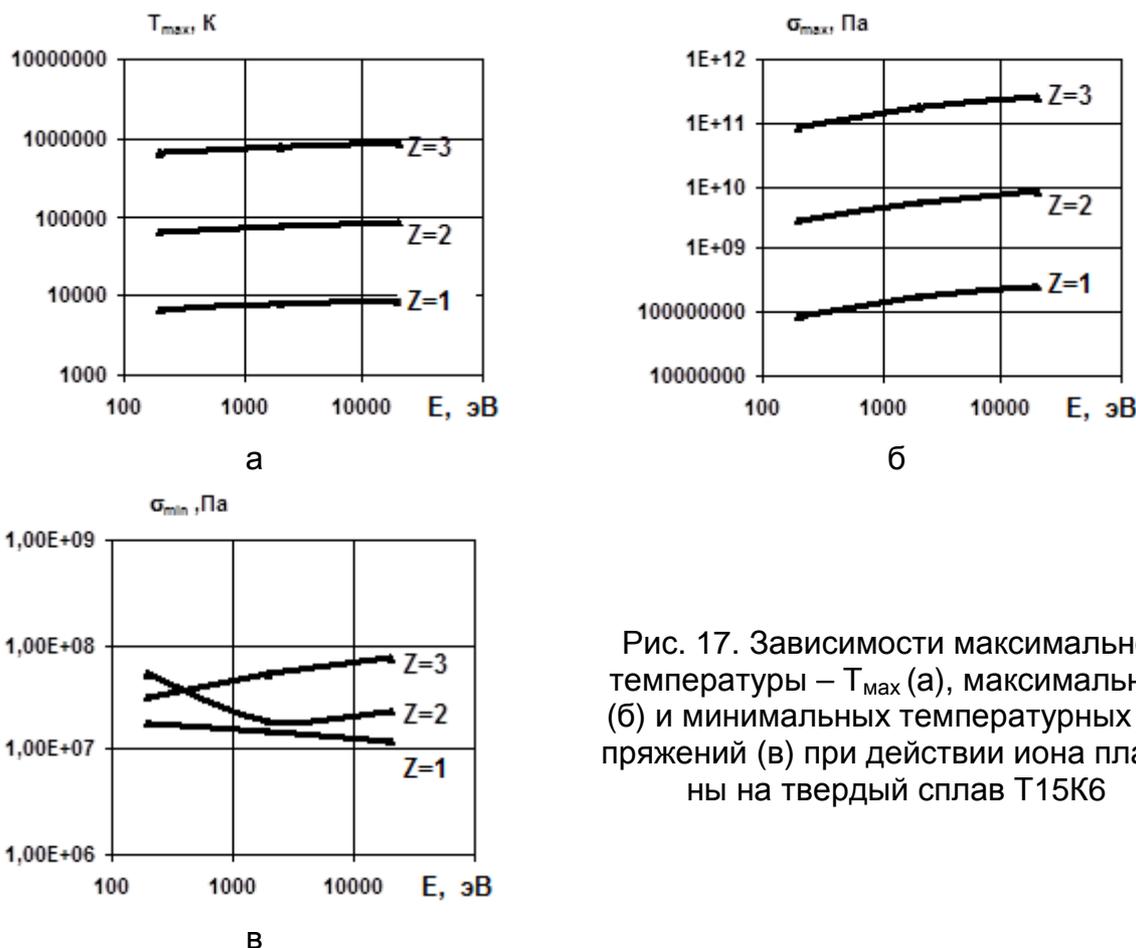


Рис. 17. Зависимости максимальной температуры – T_{max} (а), максимальных (б) и минимальных температурных напряжений (в) при действии иона платины на твердый сплав Т15К6

Результаты проведенных исследований можно использовать для оценки возможности получения наноструктур при тех или иных технологических режимах по величине температур, скорости их нарастания и значениям максимальных и минимальных температурных напряжений, приняв за критерий образования наноструктур достижение требуемого диапазона температур (500–1500 К), скоростей нарастания температур, больших чем 10^7 К/с, и наличие температурных напряжений в диапазоне $10^7 \dots 10^9$ Па, которые ускоряют процесс получения наноструктур.

Выводы

1. Для широкого круга ионов B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ , действующих на твердый сплав Т15К6, получены зависимости максимальных температур, максимальных и минимальных температурных напряжений от энергии ионов и их заряда, что можно использовать для оценки возможности образования наноструктур при соответствующих технологических режимах обработки.

2. Для ряда технологических параметров, особенно при $E_i = 2 \cdot 10^4$ эВ, можно реализовать наноструктурные слои только под действием температурных напряжений, тогда как при малых энергиях иона работает другой механизм за счет обеспечения требуемого диапазона температур.

3. Для ряда ионов получены условия, при которых создаются одинаковые температурные поля и поля температурных напряжений (например, ванадий,

хром, никель, кобальт или иттрий, цирконий, тантал, вольфрам и платина). Всё это позволяет выбирать наиболее дешёвый из ионов для получения тех же наноструктур.

4. Используя в технологии различные энергии ионов, их заряды и сорта, можно получать слои наноструктур размерами до 50...80 мкм, что позволит существенно повысить работоспособность режущего инструмента при таком способе получения наноструктурного слоя.

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 нанопокртытия: 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. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.

12. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.

13. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] /

А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

14. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е. Н. Решетняк, А. И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.

15. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.

16. 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.

Поступила в редакцию 17.02.2015

Температури і температурні напруження при дії іонів на твердий сплав Т15К6 і реалізація наноструктур

Досліджено вплив енергії іона, його заряду і сорту на величину максимальних температур, максимальних і мінімальних температурних напружень у зоні дії іонів різних сортів (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Y^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+). Показано, що максимальні температури і температурні напруження реалізуються для легких іонів: бор, вуглець, азот, тоді як мінімальні значення реалізуються для важких іонів: гафній, тантал, вольфрам, платина. Показано значний вплив енергії іона і його заряду на величини температур і температурних напружень.

Ключові слова: температури, температурні напруження, твердий сплав, іони, наноструктури.

The temperatures and thermal stresses under the influence of ions on the solid alloy T15K6 and implementation of nanostructures

The influence of the energy of the ion, its charge and the variety on the value of the maximum temperature, the maximum and minimum thermal stresses in the zone of ions of different grades (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Y^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+). It is shown that the maximum temperature and thermal stresses are realized for light ions: boron, carbon, nitrogen, whereas minimum values are realized for heavy ions: hafnium, tantalum, tungsten, platinum. The determining influence of ion energy and charge on the magnitude of temperature and thermal stresses.

Keywords: temperature, thermal stresses, hard metal, ions, nanostructure.