

ПЕРСПЕКТИВЫ И РЕАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ И НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ И В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ (I. ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

Г.И. Костюк

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
“Харьковский авиационный институт”
Украина*

Поступила в редакцию 22.11.2003

На основе реализации новых физических, технических и системных подходов к упрочнению деталей машиностроения и режущего инструмента показана возможность научного выбора эффективной технологии упрочнения и нанесения однослойных и многослойных покрытий, обеспечения высокой производительности обработки и получения равной толщины покрытий на деталях. Показана возможность существенного повышения качественных характеристик деталей за счет комбинированной обработки.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы применения деталей машиностроения и режущего инструмента (РИ) с покрытиями рассмотрены в работах Мацевитого В.М. [1], Третьякова И.П. и Верещаки А.С. [2]; применение деталей машиностроения и режущего инструмента после ионной имплантации и ионного легирования – в работах Диденко А.Н. и его школы [3]; результаты использования деталей и РИ после лазерного упрочнения рассмотрены в работах Коваленко В.С., Григорьянца А.Г. и их школ [4, 5]. Первые результаты применения комбинированных технологий упрочнения РИ на основе плазменно-ионных, ионно-лучевых и светолучевых технологий представлены в работах Костюка Г.И. и его школы [6, 7], а плазменно-ионной и ионно-лучевой – в работах Мухина В.С. и его школы [8]. Вопросы эффективного применения не упрочненного инструмента представлены в работах Родина П.Р. и его школы [9]. В монографии [6, 7], несмотря на большой ее объем, уделено достаточное внимание упрочнению деталей, а вопросу применения режущего инструмента с упрочнением посвящен справочник Костюка Г.И. [10], где рассмотрены: стойкость режущего инструмента и непосредственно связанные с ней вопросы износостойкости материала РИ, коэффициента трения, сил резания и коэффициент деформации стружки изгибных характеристик упрочненных материалов РИ, микротвердости поверхности, окисляемости и коррозионной стойкости, адгезионным характеристикам покрытий на материале РИ не уделено достаточно внимания. Вопросы теоретического прогнозирования качественных характеристик РИ в зависимости от технологических параметров, геометрических параметров размещения РИ в рабочем объеме установки, физико-механических

характеристик материала РИ до обработки и режимов резания вообще не рассматривались.

Представлен алгоритм выбора типа покрытия или упрочнения деталей, а также рекомендации по применению РИ с покрытием и комбинированным упрочнением.

В статье приведены результаты исследований автора и его школы, а также других исследователей в области создания эффективных деталей и режущего инструмента (РИ) с плазменно-ионными покрытиями (ПИО) после ионной имплантации (ИИ) и ионного легирования (ИЛ), лазерной модификации ($L_{\text{мод}}$) поверхностного слоя или закалки, а также комбинированного упрочнения на основе этих технологий. Представлены стойкость РИ, износостойкость материала детали и РИ, коэффициенты трения для упрочненного материала, изгибные характеристики материала детали и РИ с упрочнением и покрытием, силы резания и коэффициент деформации стружки для РИ с покрытием и упрочненным слоем, микротвердость поверхностного слоя материала детали и РИ, шероховатость поверхности, окисляемость и коррозионная стойкость, адгезионные характеристики покрытий на материале РИ, причем даны эти качественные характеристики для РИ из различных материалов как с упрочненным, так и с не упрочненным слоем.

Даны методы прогнозирования качественных характеристик детали и РИ (стойкость РИ, износостойкость, коэффициент трения, силы резания, микротвердость, изгибные характеристики и др.) от технологических параметров упрочнения, геометрических параметров размещения РИ в установке, физико-механических характеристик материала РИ до упрочнения и режимов резания, а также рассмотрены вопросы выбора типа упрочнения и покрытий.

Представлены значения и зависимости коэффициентов влияния типа упрочнения и покрытия на качественные характеристики (используются в методике определения вида упрочнения) от технологических параметров, физико-механических характеристик до обработки, геометрических параметров размещения РИ в установке и режимов резания.

Приведены результаты теоретического рассмотрения теплофизических и термомеханических процессов при работе детали и РИ с покрытием и упрочненным слоем, а также теория плазменно- и лазерно-механической обработки, рассчитаны поля температур и температурных напряжений, а также износ и стойкость РИ.

Представлены рекомендации по применению деталей и РИ с покрытиями и упрочненным слоем.

Статья в основном базируется на работах автора, которых более четырехсот, так, если читателя более серьезно интересуют некоторые аспекты этих технологий, то он может воспользоваться литературой, так эффективность плазменно-ионной обработки (ПИО), ионной имплантации (ИИ) или же ионно-лучевой (ИЛО), светолучевой (ЛО) и комбинированной (КО) обработок и получаемые качественные характеристики обрабатываемых деталей и РИ представлены в работах [11 – 78, 179 – 187, 208, 209, 211 – 213, 218].

Конструктивным особенностям установок для ПИО, ИЛО, ЛО и КО, а также исследованию физических процессов и их характеристик, реализующихся в этих установках, параметров потоков, используемых для технологических целей, физике пробоя и процессов в устройствах для зажигания дуги, посвящены работы [79 – 108].

Результаты исследования физических процессов, определяющих производительность и методику ее прогнозирования при ПИО, ИЛО, ЛО и КО, представлены в работах [109 – 115, 192, 206, 210, 213].

Результаты исследований качественных характеристик и их обобщения (износостойкости, микротвердости, шероховатости, адгезионных свойств, усталостной прочности, изменению теплофизических свойств, стойкости режущего инструмента, триботехнических характеристик и др.) даны в работах [116 – 149, 200 – 205, 214, 219].

Работа режущего упрочненного инструмента, в различных условиях эксплуатации, включая плазменно-механическую и лазерно-механическую обработку, рассмотрена в работах [149 – 153].

Исследованию физики взаимодействия потоков ионов, электронов, плазмы и светолучевых потоков посвящены работы [154 – 173].

Результаты исследования физических процессов в электродных пятнах, в том числе генерации частиц в пятнах, представлены в работах [174 – 177].

Генерация частиц и ресурс электродов технологических устройств рассмотрены в работах [178 – 188].

Все это позволит инженерам-практикам, научным работникам и конструкторам принимать взвешенные решения при выборе детали и режущего инструмента с покрытиями и упрочненным слоем.

Теперь рассмотрим новые физические, технические и системные подходы к упрочнению деталей и режущего инструмента.

Физические:

– критические плотности токов, при которых можно рассматривать действие индивидуальных частиц, взаимовлияющих частиц и частиц как сплошной среды;

– модель взаимодействия потоков заряженных частиц плазмы и лазерного излучения с конструкционными материалами, позволившая найти режимы облучения, при которых плотность тока влияет на коэффициент распыления, когда возможно термоупругое удаление материала (кластерный унос) в зоне действия индивидуальных частиц и термоупругое разрушение материала на периферии потока для случая плотности тока, соответствующей действию потока как сплошной среды, даны условия получения и удаления материала в жидкой фазе;

– теоретическое и экспериментальное исследование влияния температурных напряжений на эмиссионные характеристики острых и плоских катодов, а также в электродных пятнах;

– показана возможность объединения в одной комбинированной технологии плазменно-ионных покрытий, ионной имплантации, и ионного легирования, светолучевой обработки, которая позволяет получить упрочненные слои глубиной до одного миллиметра с прогнозируемыми свойствами – с распределенной по глубине микротвердостью, повышенной износостойкостью слоев, улучшенными триботехническими характеристиками;

– исследования напряженного состояния многослойных покрытий и напряжений в переходной зоне от покрытия к основному материалу детали позволяют выбирать комбинации покрытий и комбинации покрытие – основной материал, обеспечивающий требуемый знак напряжения и изменения его величины в зоне стыковки слоев. Все это позволяет не только выбирать требуемое многослойное покрытие, а и обеспечить нанесение толстых покрытий с использованием демпфирующих слоев;

– исследования физических факторов, влияющих на скорость изменения геометрии детали, позволили создать модель производительности процесса нанесения покрытия, очистки, ионного легирования и ионной имплантации, лазерного упрочнения, а также комбинированной обработки на их основе, что дало возможность найти основные параметры потоков, определяющих возможность достижения равнотолщинности покрытий, чему способствовали экспериментальные исследования распределения плотности тока, скорости нанесения покрытия, очистки, ионного полирования и фрезерования, а также физические принципы создания условий для обеспечения равномерного распределения плотности ионного тока в рабочем объеме установки;

– исследования влияния на качественные характеристики (износостойкость, стойкость РИ, шероховатость, микротвердость) технологических (физических) и геометрических параметров размещения детали (РИ) в установке, физико-механических характеристик детали до обработки и условий эксплуатации деталей и режимов резания для РИ и получение соответствующих закономерностей.

Технические:

– создание многоцелевой модульной трансформирующейся технологической вакуумной установки для комбинированного упрочнения и нанесения покрытий на основе плазменно-ионной, ионно-лучевой и светолучевой обработки;

– разработка новых высокопроизводительных испарителей и ионных источников, конструкций устройств и оснастки, обеспечивающих повышение производительности и качественных показателей деталей и РИ;

– конструирование рациональных модульных установок с учетом геометрических размеров деталей их эффективной установки в оснастке и с учетом используемых технологических модулей;

– разработка средств автоматизации и роботизации для установки и перемещения деталей с соответствующими паллетами и спутниками, для управления технологическими модулями, а также контрольно-измерительной аппаратурой (для измерения плотности ионного тока, скорости осаждения или очистки, температуры поверхности в зоне обработки и т.д.).

Системные:

– систематизация результатов, полученных автором и его школой, и результатов других исследователей для создания системных карт зависимостей качественных характеристик (износостойкость, микротвердость, шероховатость и др.) от технологических параметров для плазменно-

ионной, ионно-лучевой, светолучевой и комбинированной обработки;

– систематизация результатов полученных автором и его школой и результатов других авторов по получению зависимостей коэффициента влияния типа покрытия и упрочнения на зависимость качественных характеристик от технологических и геометрических параметров размещение детали в установке от физико-механических характеристик детали и РИ перед обработкой, условий эксплуатации деталей и режимов резания для РИ;

– создание методики оценки эффективности комбинированного упрочнения и нанесения того или иного типа покрытия с точки зрения повышения его качественных характеристик.

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЕНИЯ

КРИТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА

Так, на основе исследования характера передачи энергии налетающего электрона и иона материалу детали и характера взаимодействия зон столкновительного и теплового действия частиц получены критические плотности тока.

Так, при плотностях токов меньших первой критической не происходит наложения зон действия соседних частиц можно рассматривать действие индивидуальных частиц.

Если плотности токов лежат в диапазоне от первой до второй критической, когда происходит наложение зон влияния соседних частиц при рассеянии частиц на большие углы, то необходимо рассматривать действие взаимовлияющих частиц.

Если плотности токов больше второй критической, то в этом случае происходит наложение зон влияния частиц даже при рассеянии частиц на малые углы, и можно рассматривать действие частиц как воздействие сплошной среды.

Примеры критических плотностей токов при действии электронов на Cu, Mo, Fe и Al представлены на рис. 1, а для случая действия ионов H^+ , He^+ , Xe^+ , Ag^+ , C^+ на медь – на рис. 2.

Рассмотрены также случаи действия не моно-энергетичных потоков ионов и электронов, потока плазмы, а также критические плотности тока при падении потока под углом отличным от нормального.

МОДЕЛЬ ДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ ИОНОВ, ЭЛЕКТРОНОВ И ПЛАЗМЫ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рассматривается для случая действия индивидуальной частицы, четырех взаимодействующих

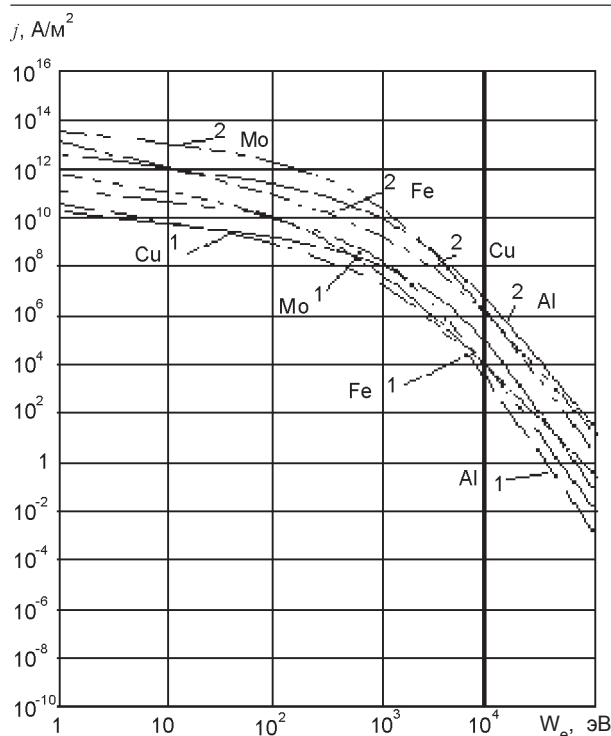


Рис. 1. Критические плотности тока, рассчитанные без учета времени релаксации тепловых колебаний, при действии электронов на мишени

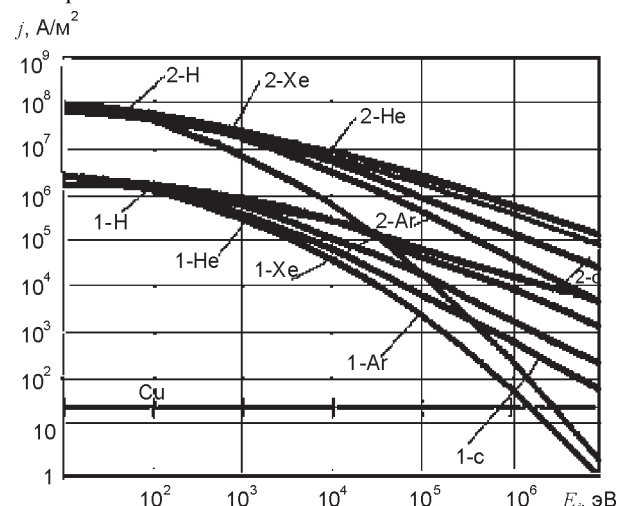


Рис. 2. Критические плотности тока при действии ионов на медь

частиц (каждая выделяет четверть своей энергии в рассматриваемый объем) и потока частиц как сплошной среды.

Взаимодействие потоков заряженных частиц и плазменных потоков с конструкционными материалами связано с реализацией широкого круга процессов: столкновительных, теплофизических, термомеханических, термоусталостных, диффузионных, термохимических и плазмохимических, но в настоящее время отсутствуют работы, учитывающие эти факторы и, тем более, их взаимосвязь. Все эти процессы влияют как на характер теплообмена, как в объеме мишени, так и на поверхности, поэтому учет этих процессов необходим как в балансе энергии в элементарном объеме металлической

мишени, так и в теплообмене на поверхности мишени, т.е. в граничных условиях.

БАЛАНС ТЕПЛА В ЭЛЕМЕНТАРНОМ ОБЪЕМЕ ДЕТАЛИ

Изменение количества тепла в единичном объеме (первое слагаемое в левой части равенства) реализуется за счет: перемещения потока частиц вдоль обрабатываемой поверхности или перемещения мишени относительно потока со скоростью V_n (второе слагаемое), теплофизических процессов, связанных с влиянием на теплообмен конечной скорости распространения тепла, теплопроводности (первое слагаемое справа), смещения фронта испарения (второе слагаемое), плавления; столкновительных процессов, возникающих от объемного источника тепла за счет действия частицы, затраты энергии на смещение атомов; термоупругих, термопластических и термоусталостных процессов, определяющих энергию деформирования материала элементарного объема; диффузионных процессов, определяющих теплоперенос диффундирующим материалом; термохимических процессов, связанных с реализацией химических реакций между материалом мишени и бомбардирующими ионами или же между компонентами сплавов и композитных материалов и ленц-джоулев нагрев за счет растекания тока (для ионного и электронного потоков).

ТЕПЛООБМЕН НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Тепловой поток на поверхности мишени создается за счет:

1. Столкновительных процессов: тепла, выделяемого на поверхности вследствие действия электрона или иона. Тепловой поток отводится с распыленными частицами, с термоэлектронами. Для ионов тепловой поток отводится с ионно-ионной эмиссией или вторичной ионной эмиссией, потенциальной ионно-электронной эмиссией, кинетической ионно-электронной эмиссией, характеристическим рентгеновским излучением, тормозным рентгеновским излучением, переходным излучением. Для электронов теплоотвод осуществляется с вторичными электронами, с вторичными фотонами, с излучением Черенкова, с переходным излучением, с тормозным рентгеновским излучением, с характеристическим рентгеновским излучением.

2. Теплофизических процессов. Отводится тепловой поток с испаренным материалом, ушедшим материалом в жидкой фазе, если создаются условия для его выброса, с тепловым излучением нагретой поверхности и с конденсированными атомами, ранее испаренными.

3. Плазмохимических процессов, реализующихся за счет реакций потока плазмы или потока ионов с распыленным и испаренным материалом мишени или с адсорбированными газами. Эта энергия передается излучением.

Передача энергии также осуществляется за счет излучения потока ионов, электронов или плазмы.

Так пример распределения температур в зоне действия индивидуальных ионов водорода (а), аргона (б) и ксенона (в) представлены на рис. 3.

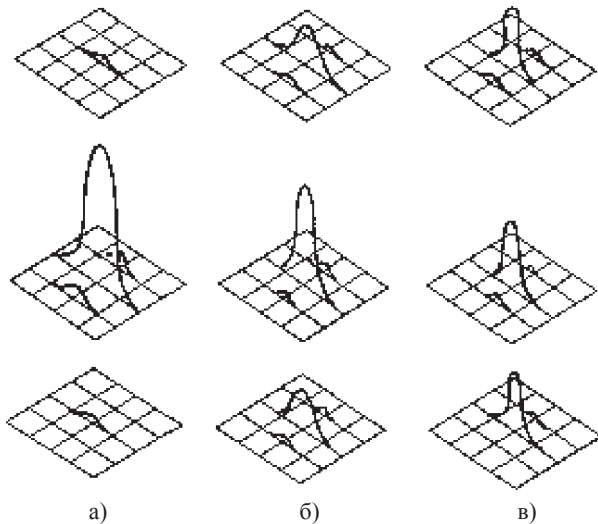


Рис. 3. Температурные поля в зоне действия ионов водорода (а), аргона (б) и ксенона (в) на мишень из алюминия: $T_m = 7,53 \cdot 10^3$ К, $E = 10^4$ эВ

Температурные поля в зоне действия взаимодействующих ионов аргона с энергией 10^3 эВ на вольфрам представлены на рис. 4, а для случая потока как сплошной среды при различном распределении потока по поверхности при столбовом (а), синусном (б) и гауссовом (в) распределении плотности тока ионов водорода с

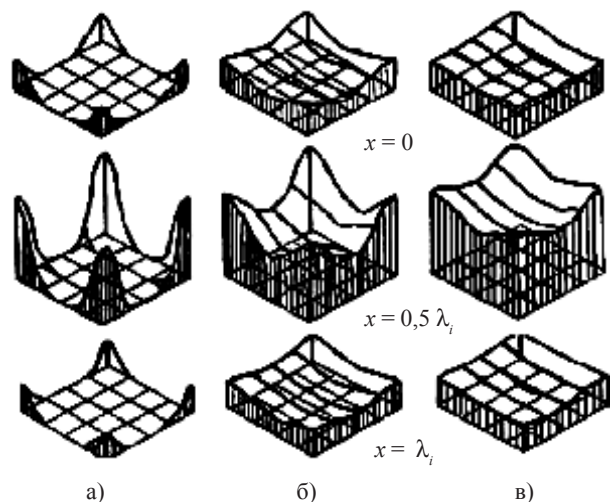


Рис. 4. Температурные поля в зоне действия ряда ионов аргона с энергией 10^3 эВ на вольфрам ($T_m = 1,7 \cdot 10^4$ К): а) $j = j_{кр}^1 = 4,1 \cdot 10^5$ А/м², б) $j = 5 \cdot 10^6$ А/м², в) $j = j_{кр}^1 = 3,9 \cdot 10^7$ А/м².

энергией 10^2 эВ, $T_{max} = 800$ К для вольфрама, меди и свинца представлены на рис. 5.

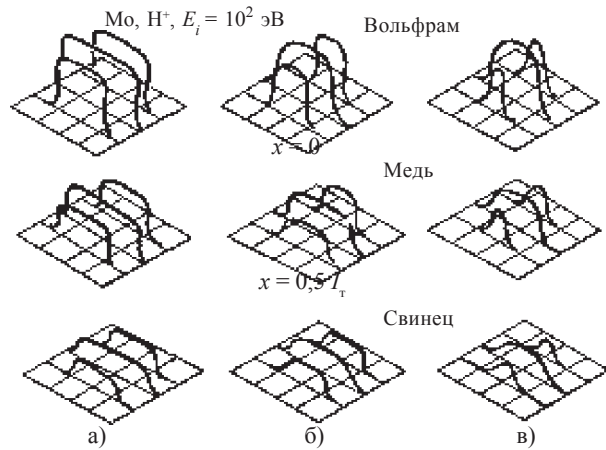


Рис. 5. Температурные поля в молибденовой мишени при столбовом (а), синусном (б) и гауссовом (в) распределении плотности тока при действии потока ионов водорода с энергией 10^2 эВ. $T_{max} = 800$ К

Для случая действия плазменного потока $E_i = 800$ эВ, $E_e = 3,8$ эВ с различными плотностями токов на алюминиевую мишень поля температур представлены на рис. 6.

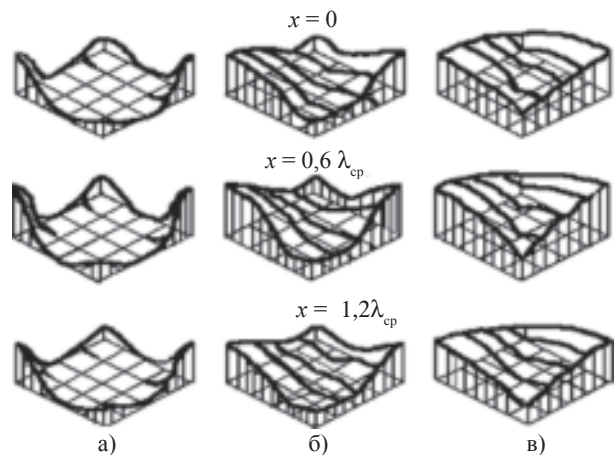


Рис. 6. Температурные поля на поверхностях $x = 0$, $x = 0,6 \cdot \lambda_{cp}$ и $x = 1,2 \cdot \lambda_{cp}$ в зоне действия плазменного потока $E_i = 800$ эВ, $E_e = 3,8$ эВ с плотностями токов: а) $j = j_{кр}^1 = 2,7 \cdot 10^6$ А/м², б) $j = 3 \cdot 10^7$ А/м², в) $j = j_{кр}^2 = 3 \cdot 10^7$ А/м² на алюминиевую мишень, $T_{max} = 810$ К.

Поле температурных напряжений в зоне действия индивидуальных ионов аргона $E_i = 10^4$ эВ ($\sigma_{max} = 7,8 \cdot 10^8$ Н/м²) на молибден представлены на рис. 7, а для случая действия взаимодействующих ионов аргона на молибден $E_i = 10^3$ эВ ($\sigma_{max} = 7,1 \cdot 10^8$ Н/м²) представлена на рис. 8.

Для случая действия потока частиц, как сплошной среды, распределение температурных напряжений представлено на рис. 9 при действии потока ионов аргона с энергией 10^3 эВ на вольфрам. Величины напряжений в зоне действия индивидуальных частиц в диапазоне энергий 10^3 –

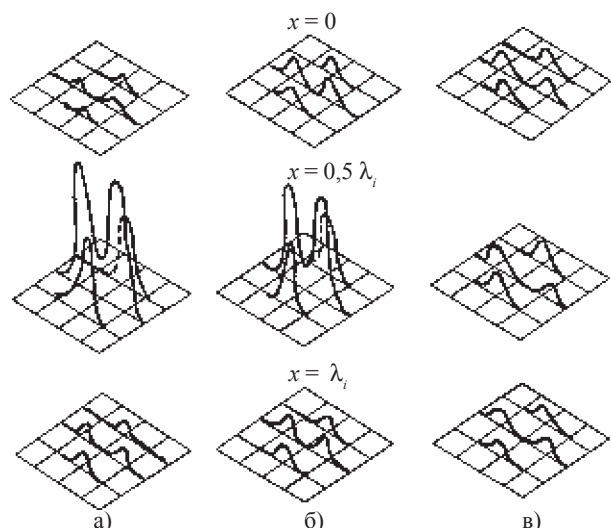


Рис. 7. Поля температурных напряжений в зоне действия ионов аргона на молибден ($E_i = 10^4$ эВ, $\sigma_{\max} = 7,8 \cdot 10^8$ Н/м²).

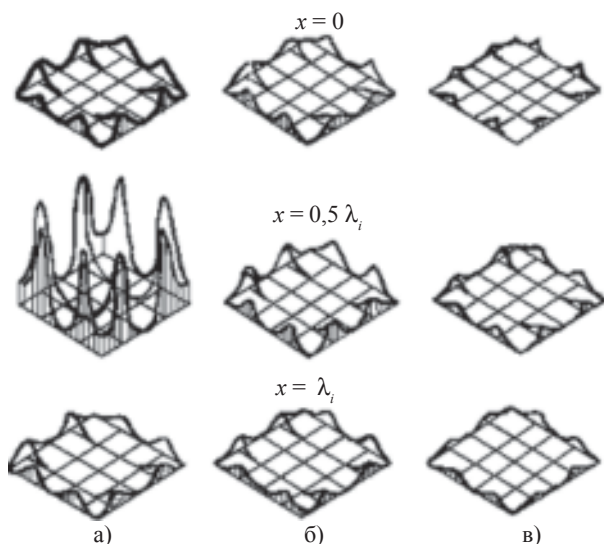


Рис. 8. Распределение температурных напряжений в зоне потока ионов аргона на молибден ($E_i = 10^3$ эВ, а) $j = j_{1кр} = 2,1 \cdot 10^6$ А/м², б) $j = j_{1кр} = 2 \cdot 10^7$ А/м², в) $j = j_{1кр} = 1,8 \cdot 10^8$ А/м²), $\sigma_{\max} = 7,1 \cdot 10^7$ Н/м²

10^4 эВ для ионов и $10^4 - 10^5$ эВ для электронов говорят о возможности кластерного (термоупругого) разрушения материала, а для случая длительного действия потоков частиц возможно термоусталостное разрушение при достижении критической дозы (блистеринг).

В результате решения этой задачи получены эффективные коэффициенты эрозии в зависимости от плотности тока и энергии частиц, которые учитывают выброс металла в твердой фазе (кластеры) и жидкой фазе, а также позволяют проследить влияние плотности тока на коэффициент эрозии (распыления). Такие зависимости для случая действия иона аргона на железо представлены на рис. 10, электронов на медь рис. 11.

На рис. 10 видно, что при энергиях 10^4 и 10^5 эВ есть вероятность выброса материала в твердой

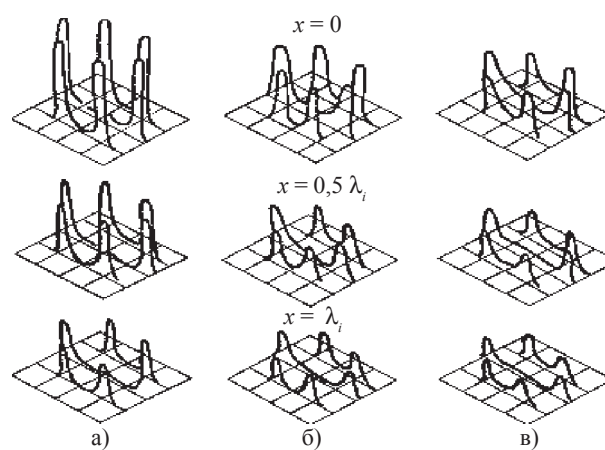


Рис. 9. Распределение температурных напряжений в зоне потока ионов аргона на молибден ($E_i = 10^3$ эВ, а) $j = j_{1кр} = 4,1 \cdot 10^5$ А/м², б) $j = j_{1кр} = 5 \cdot 10^6$ А/м², в) $j = j_{2кр} = 5,2 \cdot 10^7$ А/м²), $\sigma_{\max} = 4 \cdot 10^7$ Н/м².

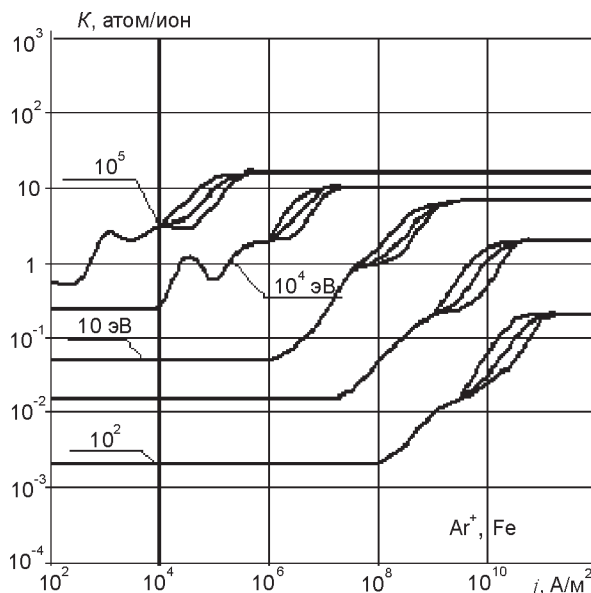


Рис. 10. Зависимости коэффициентов распыления от плотности тока для случая действия ионов аргона на железо.

фазе (кластерный унос) при плотностях токов близких к критической, причем для одной и той же энергии, в зависимости от плотности тока, можно получить коэффициент распыления отличающийся на пять порядков, что было отмечено еще в раннем обзоре Н.В. Плешивцева, но объяснение этого факта было приведено только в наших работах. Но тогда М. Каминский негативно отозвался об обзоре Н.В. Плешивцева (М.Каминский “Атомные и ионные столкновения на поверхности металла”, изд-во Мир, 1967, 506 с.) указав, что коэффициент распыления зависит только от энергии (эксперименты, проводимые им, соответствовали плотностям токов меньшим первой критической, когда коэффициент эрозии не зависит от плотности тока).

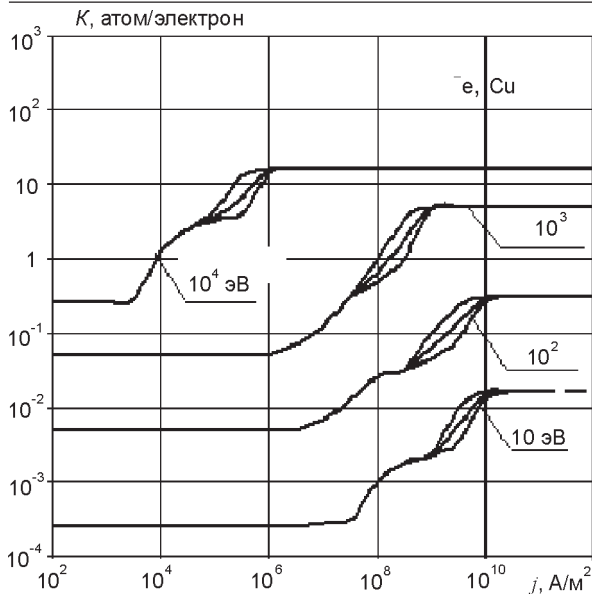


Рис. 11. Зависимости коэффициентов распыления от плотности тока для случая действия электронов на медь.

ПОВЫШЕНИЕ ЭМИССИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ИЗ-ЗА ТЕРМОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА

Получено повышение эмиссионной способности катода, как плоского, так и острейного, за счет термоупругого деформирования, которое приводит к дополнительному повышению энергии решетки в результате дополнительных ее колебаний, за счет действия нестационарных, температурных напряжений (добавка к эффективной температуре) и дополнительному повышению энергии электронного газа за счет кулоновских взаимодействий при сближении орбит электронов. Так на рис. 12 для лантаноборидного катода получена зависимость плотности ионного тока от температуры для величин температурных напряжений 10^7 , 10^8 , 10^9 Н/м². Из рисунка видно, что плотность тока при напряжениях 10^8 Н/м² увеличивается на несколько процентов, тогда как при 10^9 Н/м² может повыситься в 1,5 – 2 раза.

Исследовано влияние знака напряжений, так на рис. 13 представлена зависимость плотности тока от величины растягивающих и сжимающих напряжений.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ЭФФЕКТИВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ, СВЯЗАННЫЕ С ЕГО НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ

Проведено исследование характера изменения напряженного состояния при переходе от одного слоя к другому в динамическом и стационарном режиме работы режущего инструмента и деталей

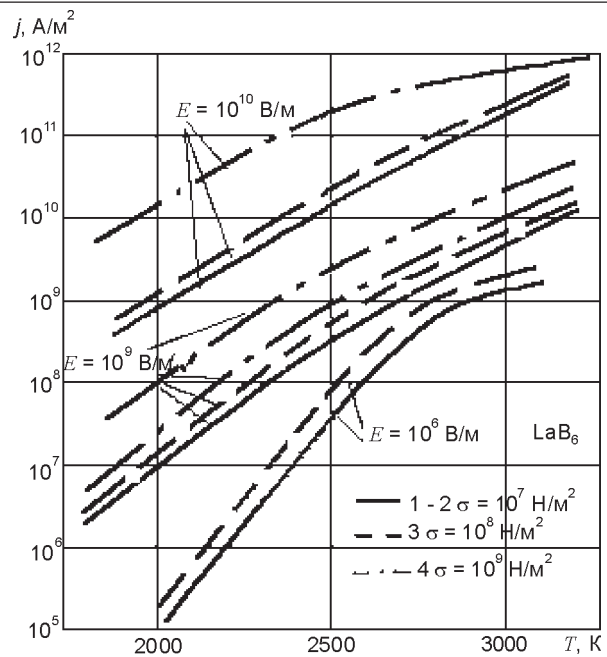


Рис. 12. Зависимости эмиссионной плотности тока от температуры поверхности катода при различных напряженностях электрического поля вблизи него и различных напряжений для лантаноборидного катода

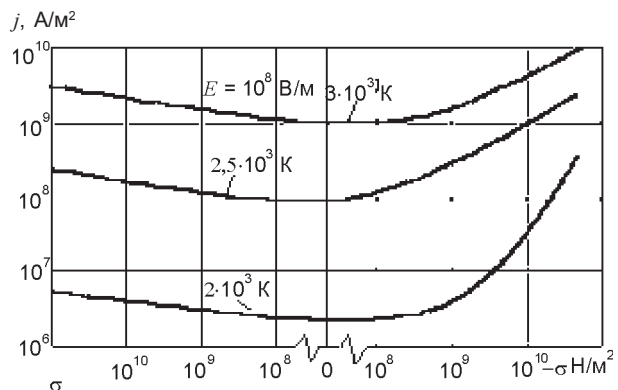


Рис. 13. Зависимость плотности эмиссионного тока от величины сжимающих (-) и растягивающих напряжений при различных температурах на поверхности лантаноборидного катода

и выбраны сочетания слоев, работающих рационально в условиях динамического, стационарного и смешанного действия температурных напряжений, для чего рассмотрены следующие вопросы:

1. Характер изменения напряженного состояния в зоне “покрытие – материал”, и в зоне перехода от одного покрытия к другому в нестационарном режиме резания (работа непрогретого инструмента или детали с нестационарными температурными полями, или работа многолезвийного инструмента).

2. Характер изменения напряженного состояния в тех же зонах в условиях близких к стационарному резанию (минимальные градиенты температур в теле инструмента).

3. На основе этих исследований выявили принципы выбора многослойных и однослойных пок-

рытий для режущего инструмента и деталей и провели экспериментальную проверку этих принципов.

4. Получены поля температур и напряжений в двух вариантах многослойных покрытий: 1(ZrN-TiN-Cr₂N) и 2(WC-ZrN-BN).

5. Проведена экспериментальная проверка стойкости РИ с этими покрытиями.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ ПОКРЫТИЕ-ДЕТАЛЬ (ИНСТРУМЕНТ) И ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ОДНОГО ПОКРЫТИЯ К ДРУГОМУ

В случае действия нестационарных температурных напряжений исследование проводилось по методике [7] для следующих условий:

– обрабатывалась сталь 40Х резцом из ВК6 с многослойными покрытиями (1-ZrN-TiN-NbN и 2-WC-ZrN-BN); – скорость резания $V = 120$ м/мин; подача $S = 0,15$ мм/об; глубина резания $t = 1,5$ мм; передний угол 7° ; задний угол 9° ; угол в плане 60° .

Так, на рис. 14 представлены поля температур и напряжений на различных расстояниях от передней и задней поверхностей за 30 секунд обработки. Видно, что для первого и второго типа покрытий характер распределения температур различен. Так, для случая второго многослойного покрытия в зоне первого слоя (WC) из-за его низкой теплопроводности наблюдается быстрое снижение температуры, как для передней, так и для задней поверхностей. В последующих слоях покрытий наблюдается более монотонный спад температуры, как для передней, так и для задней поверхности, причем при переходе от одного слоя покрытия к последующему, характер изменения температуры по глубине отличается, что связано с изменением теплофизических характеристик покрытий.

Распределение эквивалентных температурных напряжений имеет локальные максимумы в зонах каждого из покрытий и в зоне основного материала инструмента. Причем, наибольший локальный максимум наблюдается в зоне второго многослойного покрытия в области покрытия из карбида вольфрама, что объясняется максимальными градиентами температур. Это особенно выражено для передней поверхности, где градиенты максимальны.

Наличие значительных по величине эквивалентных температурных напряжений, действующих совместно с напряжениями от действия сил резания (необходимо рассматривать их суперпозицию), может приводить к упругому сколу ост-

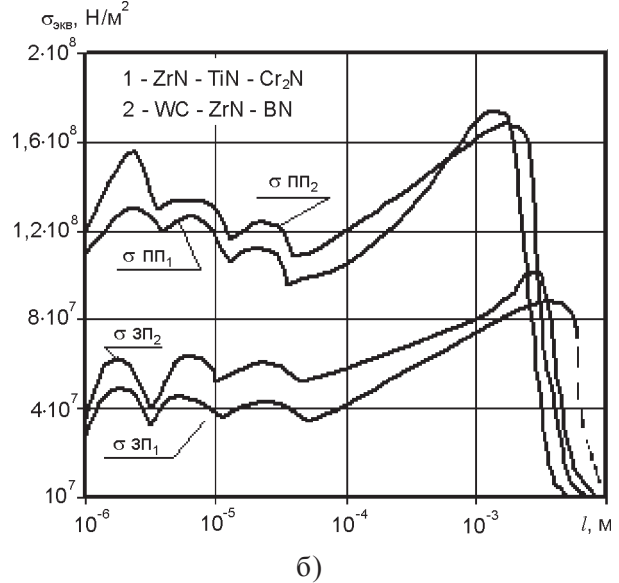
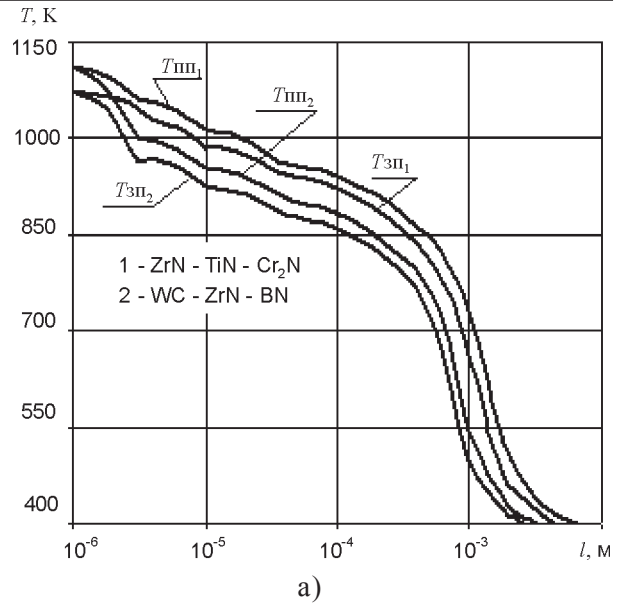


Рис. 14. Распределение температур (а) и эквивалентных напряжений (б) по глубине материала РИ по передней и задней поверхности в динамическом режиме

рия, особенно, когда температурные напряжения на поверхности покрытия являются растягивающими. В этом случае на покрытие действуют суммарные напряжения, полученные от суперпозиции температурных напряжений и изгибающих напряжений от действия сил резания, что может приводить к появлению трещины и даже непосредственно к сколу части лезвия, в зоне действия максимальных суммарных напряжений.

В случае же, когда температурные напряжения будут сжимающими, то в результате суперпозиций напряжений (в этом случае напряжения вычитаются) мы получим наиболее выгодные условия работы инструмента.

Поскольку эквивалентные напряжения говорят о величине напряжений, а не об их знаке, то проводились исследования распределения напря-

жений (нестационарных), действующих в плоскостях параллельных передней и задней поверхности, представленных на рис 14б. Видно, что в зоне покрытия из карбида вольфрама наблюдаются максимальные по величине растягивающие напряжения, которые совместно с напряжениями от действия сил резания могут создавать условия для появления трещины в покрытии и последующему сколу части острия в зоне максимальных суммарных напряжений. В слоях с другими покрытиями наблюдаются сжимающие напряжения, которые будут препятствовать, в некоторой степени, развитию трещин, а в последствии и упругому сколу острия.

Видно, что для первого многослойного покрытия все температурные напряжения сжимающие, и температурные напряжения будут только снижать суммарные напряжения в покрытии, что будет способствовать его нормальной работе, а значит, следует ожидать и большей стойкости инструмента, особенно многолезвийного или работающего в периодическом режиме, для которого стойкость определяется, в основном, действием нестационарных напряжений.

В то же время, как видно из рис. 14б, в зоне покрытия и переходе от покрытия к основному материалу режущего инструмента высокие градиенты напряжений также могут быть опасны с точки зрения зарождения трещин. Для того, чтобы определить изменение напряжений по величине и знаку, были проведены расчеты величин отношений напряжения в первом покрытии к напряжению во втором покрытии и определен знак напряжения на первом покрытии по рассмотренной ранее модели. Систематизированные результаты расчетов представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что можно выбрать многослойное покрытие таким образом, что величины температурных напряжений при переходе от одного покрытия к другому будут незначительно отличаться по величине (не будет градиентов напряжений), и также выбрать знак напряжений в соответствии с условиями работы инструмента.

Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает:

- для получения работоспособного при динамических нагрузках инструмента с многослойными покрытиями необходимо выбрать сочетание: первое – второе покрытия, для которых на первое покрытие действуют сжимающие напряжения, что снизит вероятность появления трещин в покрытии;
- отличие напряжений по величине при переходе от первого покрытия ко второму не должно превышать 30%, что позволит избежать значитель-

ных по величине динамических температурных напряжений в переходной зоне от одного типа покрытия к другому, что, в свою очередь, снизит вероятность отслаивания одного покрытия по отношению ко второму;

– такими принципами необходимо пользоваться для второго и третьего (третьего и четвертого и т.д.) слоя и для последующих слоев;

– этой таблицей следует пользоваться, если условия работы инструмента можно назвать прерывистыми, если время резания одним инструментом невелико, и он не нагревается на значительную глубину, или для работы многолезвийного инструмента, для каждого лезвия которого реализуется прерывистый режим работы.

Причем динамические (нестационарные) температурные напряжения в зоне перехода от покрытия к основному материалу (быстрорежущая сталь P5M6) в основном являются сжимающими (кроме WC), но они отличаются на величины, значительно большие 30% (более чем в 10 раз для TiC, WC, BN).

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ И КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ОДНОГО ПОКРЫТИЯ К ДРУГОМУ И ОТ ПОКРЫТИЯ К ОСНОВНОМУ МАТЕРИАЛУ

По аналогии с предыдущим разделом по методике [7] для тех же условий обработки были рассчитаны поля температур и стационарных температурных напряжений в квазистационарном режиме работы РИ (рис. 15).

Видно, что поля температур сглаживаются, и значительные градиенты температур реализу-

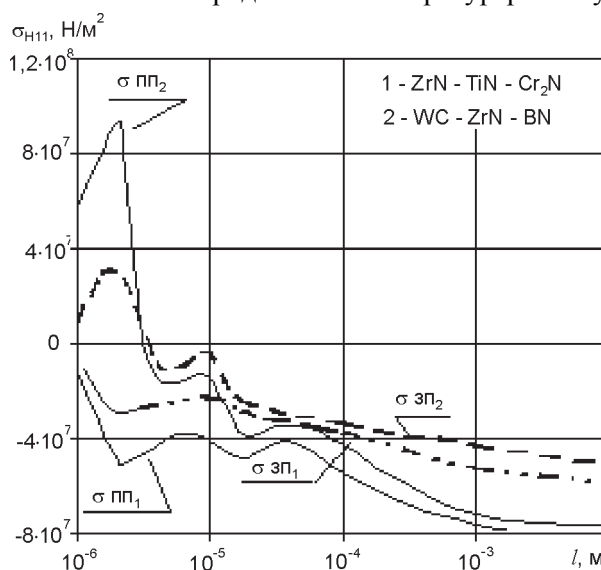


Рис. 15. Распределение квазистационарных напряжений по глубине материала РИ по передней и задней поверхности в стационарном режиме

№	Первое покрытие	Изменение динамических температурных напряжений при переходе от первого покрытия ко второму																
		до ±20%							От ±20% до ±30%									
1	TiC	WC										$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$						1
2	ZrC	Nb ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂	VN						TaC	Ta ₂ N					6
3	HfC	VC	Nb ₂ C	TaN	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$							TiC						3
4	VC	HfC	Nb ₂ C	Ta ₂ N	TaN	Si ₂ N ₂						$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$						3
5	Nb ₂ C	HfC	VC	Ta ₂ N	TaN	Si ₂ N ₂						$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$						2
6	NbC	ZrC	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	Cr ₂ C ₃							VC	TiN	Ta ₂ N	Si ₂ N ₂			4
7	TaC	ZrC	Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ C	TiN							NbC	Cr ₇ C ₃	Cr ₂ C ₃	VN	V ₂ N	Cr ₂ N	4
8	Ta ₂ C	W ₂ C	ZrN	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	CrN	HfN						Mo ₂ C	V ₂ N	NbN	Cr ₂ N			5
9	Cr ₂₃ C ₆	ZrC	NbC	TaC	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂	VN					нет						1
10	Cr ₇ C ₃	ZrC	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₃ C ₂	VN							VC	TiN	Ta ₂ N	Si ₂ N ₂			2
11	Cr ₃ C ₂	ZrC	Nb ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	VN						VC	TiN	Ta ₂ N	Si ₂ N ₂			1
12	Mo ₂ C	ZrC	TaC	Cr ₂₃ C ₆	TiN	NbN						NbC	Cr ₇ C ₃	Cr ₂ C ₃	VN	V ₂ N	Cr ₂ N	8
13	W ₂ C	Ta ₂ C	ZrN	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	CrN	HfN						Mo ₂ C	V ₂ N	NbN	CrN			3
14	WC	TiC										BN	NbC	Cr ₂ C ₃	Cr ₂ C ₃	VN		1
15	TiN	ZrC	TaC	Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ C													3
16	ZrN	Ta ₂ C	W ₂ C	TiN	V ₂ N	Cr ₂ N	CrN	HfN	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	нет								4
17	VN	ZrC	NbC	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂						VC	TiN	Si ₂ N ₂	Ta ₂ N			4
18	V ₂ N	ZrC	TaC	Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ C	Cr ₂ N						NbC	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂	VN			9
19	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	Ta ₂ C	W ₂ C	TiN	ZrN	V ₂ N	Cr ₂ N	CrN	HfN	Mo ₂ C								4
20	NbN	ZrN	TaC	Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ C	TiN	V ₂ N	Cr ₂ N				NbC	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂	VN			1
21	Ta ₂ N	VC	Nb ₂ C	NbC	Cr ₇ C ₃	VN	Si ₂ N ₂					HfN	Cr ₃ C ₂	TaN				8
22	TaN	HfN	VC	Nb ₂ C	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$							TiC						4
23	Cr ₂ N	ZrC	TaC	Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ C	TiN	NbN					NbC	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂	VN	V ₂ N		3
24	CrN	Ta ₂ C	W ₂ C	TiN	ZrN	V ₂ N	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	Cr ₂ N	NbN	Mo ₂ C								8
25	Si ₂ N ₂	NbC	VC	Nb ₂ N	VN	Ta ₂ N	TaN					NbC	Cr ₇ C ₃	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Cr ₂ N			10
26	HfN	Ta ₂ C	W ₂ C	ZrN	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	CrN						Mo ₂ C	V ₂ N	NbN				5
27	BN	Нет ни одного										нет					нет	
28	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	TiC	HfC	TaN														4

Примечание. Для стали все ⊖, кроме WC ⊕.

ются только в зоне слоя из покрытия WC, хотя и в зоне других покрытий величины напряжений также значительны и превышают напряжения, реализующиеся в основном материале инструмента (время работы РИ – 30 мин). Величины стационарных температурных напряжений в основном материале инструмента снижаются более, чем в 10 раз по сравнению с динамическим, а для покрытий – более чем в 3 раза, как по передней, так и по задней поверхности РИ.

Видно, что стационарный и квазистационарный режимы являются более мягкими по эквивалентным напряжениям по сравнению с режимом с нестационарными температурными напряжениями.

Как и для нестационарных температурных напряжений, характер деформирования первого покрытия будет определять длительную стойкость режущего инструмента. Поэтому рассмотрим характер распределения стационарных температурных напряжений по глубине, который представлен на рис. 16.

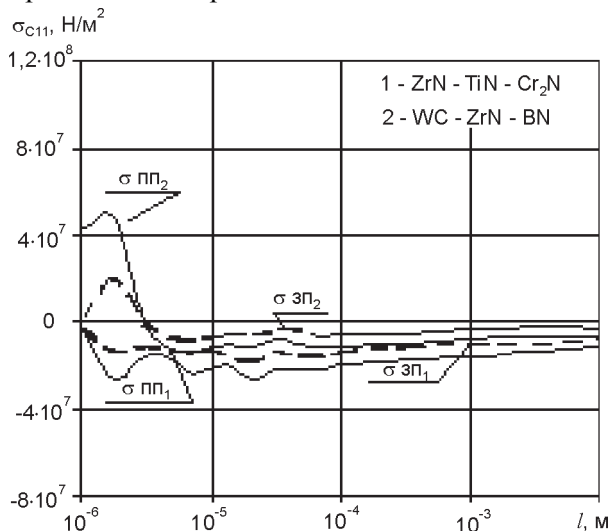


Рис. 16. Распределение и стационарных напряжений по глубине материала РИ по передней и задней поверхности в стационарном режиме

Видно, что для второго многослойного покрытия в слое WC реализуются растягивающие напряжения, тогда как в зоне остальных слоев сжимающие. Для первого многослойного покрытия (ZrN+TiN+NbN) практически везде до расстояния 10 мкм реализуются сжимающие напряжения.

По рассмотренной модели были проведены расчеты величин напряжений при переходе от первого покрытия (соприкасающегося с обрабатываемым материалом) ко второму. Для двадцати восьми типов покрытий в табл. 2 представлены обработанные и сгруппированные результаты расчетов отношений температурных напря-

жений в первом покрытии к напряжениям во втором или материале РИ.

Анализ результатов, представленных в табл. 2, показывает, что число сочетаний покрытий, которые удовлетворяют отличию напряжений по абсолютной величине на 30%, значительно увеличилось для стационарных напряжений. Существенно, также увеличилось число сочетаний покрытий, для которых в первом покрытии реализуются сжимающие напряжения. У значительного числа покрытий величина стационарных напряжений отличается на 30% и менее, а число покрытий, в которых напряжения сжимающие, возросло значительно.

Число покрытий, для которых выполняются оба принципа, и они имеют более десяти вариантов, – семь (VC, V₂O, N₂C, Ta₂C, MoC, W₂C, TaN). Число покрытий, которые удачно сочетаются с основным материалом (быстрорежущая сталь Р6М5), – двадцать. Случай действия стационарных напряжений более благоприятен для многослойных покрытий и для работы однослойного покрытия.

Часто нельзя конкретно определить в каком режиме будет работать режущий инструмент: – при действии стационарных температурных напряжений; – при действии нестационарных температурных напряжений.

Тогда необходимо выбрать такие сочетания покрытий, которые будут удовлетворять требованиям, необходимым для двух режимов работы инструмента. Сравнив табл. 1 и 2, получим те сочетания, которые будут работать в любом режиме, эти комбинации представлены в табл. 3.

Видно, что для двенадцати покрытий не нашлось ни одного покрытия, которое бы сочеталось достаточно удачно для работы в двух режимах.

Наиболее удачными оказались покрытия карбид циркония, который удачно сочетается с четырьмя покрытиями (Nb₂C, Cr₃C₃, VN, TaC), нитрид ванадия – тремя (Cr₂₃C₆, Cr₇C₃, Cr₃C₂), нитрид тантала – тремя (Cr₇C₃, Cr₃C₂, NbO). Ряд покрытий имеет по два и по одному удачному сочетанию.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для экспериментальной проверки полученных результатов были проведены испытания на износостойкость инструмента с покрытием нитрид титана многослойные покрытия 1 – (ZrN-TiN-CrN) и 2 – (WC-ZrN-BN) и контрольное испытание резца из Р6М5 без покрытия при обработке стали 40Х со следующими режимами обработки:

– скорость резания $V = 120$ м/мин; подача $S = 0,15$ мм/об; глубина резания $t = 1,5$ мм.

№	Первое покрытие	Изменение стационарных температурных напряжений при переходе от первого покрытия ко второму									
		± 10 %									
1	TiC	Nb ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	Mo ₂ C	α-Al ₂ O ₃	Сталь				
2	ZrC	HfC	Nb ₂ C	W ₂ C	TiN	Mo ₂ N					
3	HfC	ZrC	W ₂ C	Mo ₂ N							
4	VC	V ₂ C	TaC	MoC	VN	Ta ₂ N	α-Al ₂ O ₃	Сталь			
5	V ₂ C	VC	TaC	MoC	ZrN	VN	Ta ₂ N	Cr ₂ N			
6	Nb ₂ N	TiC	Cr ₂₃ C ₇	Cr ₇ C ₃	α-Al ₂ O ₃	Сталь	Mo ₂ C				
7	NbC	ZrC	HfC	W ₂ C	TiN	ZrN	Mo ₂ N				
8	TaC	VC	V ₂ C	Cr ₇ C ₃	VN	α-Al ₂ O ₃					
9	Ta ₂ C	HfN	TaN	W ₂ N							
10	Cr ₂₃ C ₆	TiC	V ₂ C	Cr ₇ C ₃	Mo ₂ C	α-Al ₂ O ₃	Сталь	NbC			
11	Cr ₇ C ₃	TiC	VC	Nb ₂ C	TaC	Cr ₂₃ C ₆	VN	α-Al ₂ O ₃			
12	Cr ₃ C ₂	V ₂ C	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	Сталь							
13	Mo ₂ C	V ₂ C	NbC	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₃ C ₂	Сталь					
14	MoC	VC	V ₂ C	NbC	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	W ₂ C	ZrN	VN	Ta ₂ N	Cr ₂ N
15	W ₂ C	ZrC	HfC	NbC	MoC	ZrN	Ta ₂ N	Cr ₂ N	Mo ₂ N		
16	WC	нет									
17	TiN	CrN	HfC	NbC	Ta ₂ C	Mo ₂ N					
18	ZrN	VC	V ₂ C	MoC	W ₂ C	VN	Ta ₂ N	Cr ₂ N			
19	NbN	W ₂ N									
20	VN	VC	V ₂ C	TaC	MoC	Ta ₂ N	Cr ₂ N				
21	V ₂ N	нет									
22	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	NbN	BN								
23	NbN	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	BN								
24	Ta ₂ N	VC	V ₂ C	MoC	W ₂ C	Zr ₂ N	VN	Cr ₂ N			
25	TaN	нет									
26	Cr ₂ N	VC	V ₂ C	MoC	W ₂ C	Zr ₂ N	VN	Ta ₂ N			
27	CrN	Si ₂ N ₂									
28	Mo ₂ N	CrC	HfC	W ₂ C	TiN						
29	W ₂ N	Ta ₂ C	HfN	Сталь							
30	W ₂ N	CrN									
31	BN	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	NbN								
32	α-Al ₂ O ₃	TiC	VC	TaC	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	VN	Сталь			

Таблица 2 (продолжение 1)

№	Первое покрытие	Изменение стационарных температурных напряжений при переходе от первого покрытия ко второму								
		от ± 10% до ± 20%								
1	TiC	VC	Cr ₂ C ₃	VN						
2	ZrC	V ₂ C	MoC	ZrN	Ta ₂ N	CrN				
3	HfC	V ₂ C	Ta ₂ C	MoC	ZrN	Ta ₂ N	TaN	Cr ₂ N		
4	VC	TiC	Nb ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	W ₂ C	ZrN			
5	V ₂ C	TiC	NbC	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	W ₂ C	Mo ₂ N	α-Al ₂ O ₃		
6	Nb ₂ N	VC	TaC	Cr ₂ C ₃	VN					
7	NbC	VC	V ₂ C	Mo ₂ C	MoC	VN	Ta ₂ N	CrN		
8	TaC	TiC	Nb ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ C	MoC	ZrN	TaN	CrN	Сталь
9	Ta ₂ C	нет								
10	Cr ₂₃ C ₆	VC	TaC	Cr ₃ C ₂	VN					
11	Cr ₇ C ₃	V ₂ C	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	MoC	Сталь				
12	Cr ₃ C ₂	TiC	V ₂ C	NbC	Cr ₂₃ C ₆	NbN	BN	α-Al ₂ O ₃		
13	Mo ₂ C	Cr ₇ C ₃	NbN _{0.9} - NbN _{1.0}	NbN	BN	α-Al ₂ O ₃				
14	MoC	TiC	TaC	Mo ₂ N	Si ₂ N ₂	α-Al ₂ O ₃				
15	W ₂ C	VC	V ₂ C	TaC	Cr ₇ C ₃	Mo ₂ N	TiN	VN		
16	WC	нет								
17	TiN	MoC	W ₂ C	ZrN	Cr ₂ N	W ₂ N				
18	ZrN	TiC	NbC	TaC	Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ N	S ₂ N ₂	α-Al ₂ O ₃		
19	NbN	нет								
20		TiC	Nb ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃		ZrN	α-Al ₂ O ₃	Сталь	
21	V ₂ N	нет								
22	NbN _{0.9} - NbN _{1.0}	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C							
23	NbN	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C							
24	Ta ₂ N	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	TiC	NbC	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	Mo ₂ N	Si ₂ N ₂	α-Al ₂ O ₃
25	TaN	V ₂ N								
26	Cr ₂ N	TiN	NbC	TaC	Cr ₇ C ₃	Mo ₂ C	Si ₂ N ₂	BN	α-Al ₂ O ₃	Mo ₂ N
27	CrN	нет								
28	Mo ₂ N	VC	V ₂ C	MoC	ZrN	VN	Ta ₂ N	TaN	Cr ₂ N	
29	W ₂ N	Cr ₂ N								
30	W ₂ N ₂	нет								
31	BN	нет								
32	α-Al ₂ O ₃	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C							

Таблица 2 (продолжение 2)

№	Первое покрытие	Изменение стационарных температурных напряжений при переходе от первого покрытия ко второму							Число разрешенных сочетаний	Сочетания с быстрорежущей сталью	
		от $\pm 20\%$ до $\pm 30\%$									
1	TiC	V ₂ C	MoC	NbN	TaN	BN			5	-	
2	ZrC	VC	TaC	Ta ₂ C	Cr ₇ C ₃	VN			6	-	
3	HfC	VC	TaC	HfN	VN	W ₂ N			9	-	
4	VC	ZrC	HfC	NbC	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	Mo ₂ N		12	I	
5	V ₂ C	ZrC	HfC	Nb ₂ C	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	TiN	Сталь	13	III	
6	Nb ₂ N	V ₂ C	MoC	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	NbN	Ta ₂ N	BN		11	I	
7	NbC	TaC	Ta ₂ C	Cr ₇ C ₃	TaN	α -Al ₂ O ₃			5	-	
8	TaC	Cr ₃ C ₂	W ₂ C	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}					14	II	
9	Ta ₂ C	ZrC	HfC	Mo ₂ N					1	-	
10	Cr ₂₃ C ₆	V ₂ C	MoC	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	NbN	Ta ₂ N	BN		4	I	
11	Cr ₇ C ₃	W ₂ C	ZrNa	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	NbN	BN			7	II	
12	Cr ₃ C ₂	Cr ₇ C ₃	α -Al ₂ O ₃						4	I	
13	Mo ₂ C	нет							8	I	
14	MoC	ZrN	HfC	Nb ₂ C	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	TiN	Сталь	23	III	
15	W ₂ C	TiC	Nb ₂ C	Ta ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	α -Al ₂ O ₃	Сталь		14	III	
16	WC	нет							Нет	Нет	
17	TiN	VC	V ₂ C	TaC	HfN	VN	Ta ₂ N		2	-	
18	ZrN	ZrC	HfC	Nb ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ C	TiN	Сталь	9	III	
19	NbN	ZrC	HfC	W ₂ C	TiN	Mo ₂ N			4	-	
20	VN	ZrC	HfC	NbC	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ N			7	II	
21	V ₂ N	Cr ₂ N							1	-	
22	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	Cr ₂₃ C ₆	Сталь						4	III	
23	NbN	Cr ₂₃ C ₆	Сталь						3	III	
24	Ta ₂ N	ZrC	HfC	V ₂ C	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	TiN	Сталь	16	III	
25	TaN	нет							Нет	-	
26	Cr ₂ N	ZrC	HfC		Cr ₂₃ C ₆	Mo ₂ C	TiN	Сталь	3	III	
27	CrN	нет							1	-	
28	Mo ₂ N	TaC	Ta ₂ C	Cr ₇ C ₃	α -Al ₂ O ₃				12	-	
29	W ₂ N	ZrC	HfC	TiN	CrN	Mo ₂ N			7	I	
30	W ₂ N ₂	нет							Нет	-	
31	BN	N ₂ C	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	Сталь				5	III	
32	α -Al ₂ O ₃	V ₂ C	MoC	ZrN	NbN _{0.6} - NbN _{1.0}	Ta ₂ N	NbN	Cr ₂ N	BN	9	I

Таблица 3

№	Материал покрытия	Покрытия, сочетающиеся для нестационарных и стационарных напряжений				Число сочетаний
1	TiC	нет				нет
2	ZrC	Nb ₂ C	Cr ₇ C ₃	VN	TaC	4
3	HfC	нет				Нет
4	VC	α-Al ₂ O ₃				1
5	Nb ₂ C	V C	α-Al ₂ O ₃			2
6	NbC	нет				Нет
7	TaC	TiN				1
8	Ta ₂ C	нет				Нет
9	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃				1
10	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂				1
11	Cr ₃ C ₂	нет				Нет
12	Mo ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₃ C ₂			2
13	W ₂ C	Ta ₂ C	Mo ₂ C			2
14	WC	нет				Нет
15	TiN	нет				Нет
16	ZrN	TiN	V ₂ C	Cr ₂ N		3
17	HfN	W ₂ C				1
18	VN	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂		3
19	V ₂ N	Cr ₂ N				1
20	NbN _{0,6} - NbN _{1,0}	нет				Нет
21	NbN	Mo ₂ C				1
22	Ta ₂ N	Cr ₇ C ₃	Cr ₃ C ₂	NbC		3
23	TaN	нет				Нет
24	Cr ₂ N	Cr ₂₃ C ₆				1
25	CrN	нет				нет
26	Si ₂ N ₂	нет				нет
27	BN	нет				нет
28	α-Al ₂ O ₃	TiC				TiC

Геометрические характеристики режущей части: – задний угол 9°; – передний угол 7°; – угол в плане 60°.

Стойкость определялась по кардинальным изменениям во времени силы резания, (измерялась тензометрическим динамометром), сигнал от тензодатчика регистрировался СИИТ и в цифровом коде выводился на ЭВМ, где обрабатывался в реальном времени.

Время критического износа также определялось по частоте акустического сигнала в зоне резания. Испытывалось 10 резцов с каждым видом покрытия.

Результаты исследования износостойкости представлены в табл. 4.

Таблица 4

	Материал режущего инструмента и покрытия			
	P6M5	P6M5+TiN	P6M5+ZrN+TiN+Cr2N	P6M5+W+ZrN+BN
Период стойкости, мин	39,4	90,5	280	178
Характер износа РИ	Критич. износ по задней пов-ти	Истирание с частич. сколом покрытия	Полное истирание покрытия	Скол покрытия и повреждение поверхности
Повышение той-кости, раз	-	2,3	7,1	4,5

Как видно из табл. 4, удачное сочетание слоев в многослойном покрытии (ZrN-TiN-Cr₂N) приводит к равномерному его изнашиванию, и стойкость инструмента, даже без комбинированного упрочнения, может быть повышена в 7,1 раз, тогда как вторая комбинация (более дорогая в реализации), привела к существенно меньшему повышению стойкости. Это связано с появлением трещин в слое, соприкасающемся с обрабатываемым материалом (WC), который работает со значительными растягивающими температурными напряжениями. На передней поверхности также действуют растягивающие напряжения, за счет действия сил резания, которые в суперпозиции с температурными, достаточны для растрескивания слоев покрытия – WC, которое частично уносится, разрушая слой ZrN и BN, что приводит к быстрому разрушению покрытия и снижению периода стойкости по сравнению с тем, который был бы при равномерном износе покрытия. Первое многослойное покрытие, исходя из теоретических предпосылок, должно было иметь большую износостойкость, чем второе, что экспериментально подтверждается.

Проведенные исследования позволяют утверждать:

1. При выборе многослойного покрытия для однолезвийного режущего инструмента, который работает и в динамическом, и в стационарном режимах, необходимо удовлетворение критерию действия сжимающих температурных напряжений в покрытии, соприкасающемся с деталью, для

обоих режимов и отличие значений напряжений в слоях, должно не превышать 30%, для чего нужно пользоваться табл. 3 при выборе слоев покрытия.

2. Для РИ и деталей, работающих в динамическом (периодическом) режиме, в частности, многолезвийный инструмент, необходимо, чтобы нестационарные температурные напряжения в первом случае были сжимающими и их значения в соседних слоях не отличались бы на величину более 30 %. Дополнительное условие – так как почти все покрытия имеют диапазон значений напряжений, превышающее 30 % по отношению к быстрорежущей стали, то в этом случае нужно создавать дополнительный переходной слой (даже за счет имплантации или лазерного упрочнения) для снижения вероятности скола многослойного покрытия (используй табл. 1).

3. Для РИ, работающих в стационарном и близком к стационарному режиму, необходимо, чтобы стационарные температурные напряжения на первом слое покрытия были сжимающими, а их величина при переходе от слоя к слою изменялась не более, чем на 30 %, таким условиям отвечают покрытия (не затемненные), представленные в табл. 2.

4. Экспериментально показано, что предложенные теоретические предпосылки повышения износостойкости РИ с многослойным покрытием имеют право на жизнь и будут полезны при решении вопроса о повышении стойкости режущего инструмента за счет многослойных покрытий.

МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПЛАЗМЕННО-ИОННОЙ, ИОННО-ЛУЧЕВОЙ, ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ, СВЕТОЛУЧЕВОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТОК

Учитывая следующее: распыление ионами, атомами перерезрядки, электронами, удаление за счет радиационно-стимулированной диффузии, внедрение ионов и атомов перерезрядки, испарение, массоунос в жидкой фазе, конденсация в паровой фазе, массоунос за счет термоупругого разрушения под действием ионов и электронов, термоусталостное отслаивание материала при достижении критической дозы облучения, действие электродных пятен, массоперенос в капельной фазе, массоунос за счет радиационно-стимулированных химических реакций – выражение для скорости изменения геометрического размера детали определяется так:

$$V_{\Sigma} = -A_1 \underbrace{\frac{j_i m_M}{l \gamma_M} K_i [E_i, j_i, \alpha]}_1 - A_2 \underbrace{P_i \frac{j_i m_i}{l \gamma_M} K_a [E_a, j_i, \alpha]}_2 -$$

$$\begin{aligned} & - A_3 \underbrace{\frac{j_e m_M}{l \gamma_M} K_e [E_e, j_e, \alpha]}_3 - A_4 \underbrace{0,4 \cdot \frac{\partial E_{\text{пекр}}}{\partial x} \frac{j_{ie} m_{Mya}}{l \gamma_M} P_{BMya}}_4 + \\ & + A_5 \underbrace{\frac{j_i m_i}{l \gamma_M}}_5 + A_6 \underbrace{P_{ia} \frac{j_i m_a}{l \gamma_M}}_6 - \underbrace{\frac{1}{\gamma_M} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}} \left[\exp\left(\frac{A-B}{T}\right) - P_{oct} \right]}_7 - \\ & - B_1 \underbrace{\frac{j_i}{\gamma_M} K_{\gamma,h} [q, \tau_u, U_k] P_{cTMh}}_8 - B_2 \underbrace{\frac{j_e}{\gamma_M} K_{\gamma,h} [j_a, \tau_u, U_a] P_{cTMh}}_8 - \\ & - B_3 \underbrace{\frac{m_{cTMh} [q, \tau_{I,l}]}{\gamma_M} f_n P_{cTMh}}_9 - B_4 \underbrace{\frac{m_{cTMh} [q_{\gamma}, \tau_{I,l}]}{\gamma_M} f_j P_{cTMh}}_9 + \\ & + B_5 \underbrace{\frac{j_a m_a}{l \gamma_M}}_{10} - C_1 \underbrace{\frac{j_i}{l} S_{Toi} \Delta l_{TVAi}}_{11} - C_2 \underbrace{\frac{j_e}{l} S_{Toe} \Delta l_{TV Ae}}_{12} - \\ & - C_3 \underbrace{f_n \frac{S_{TAh} [q_n \tau_u] \Delta l_{TVoi} [q_n \tau_u]}{S_D n_D}}_{13} - C_4 \underbrace{f_{\gamma} \frac{S_{TA\gamma} [q_{\gamma} \tau_u] \Delta l_{TVo\gamma} [q_{\gamma} \tau_u]}{S_D n_D}}_{13} - \\ & - D_1 \underbrace{\frac{j_i}{l} \frac{\Delta l_{TYOi}}{D_{Pi}}}_{14} - D_2 \underbrace{\frac{j_e}{l} \frac{\Delta l_{TYOe}}{D_{Pe}}}_{15} - \\ & - D_3 \underbrace{f_n \frac{\Delta l_{TYOn} [q_n \tau_u]}{D_{Pn}}}_{16} - D_4 \underbrace{f_{\gamma} \frac{\Delta l_{TYO\gamma} [q_{\gamma} \tau_u]}{D_{P\gamma}}}_{16} - \\ & - E \underbrace{\frac{dN_n}{dt} \frac{S_a}{S_D h_D} \Delta n}_{17} \pm F_1 \underbrace{\frac{j_i}{l} V_{TXPi} \frac{m_{oK}}{\gamma_M}}_{18} \pm F_2 \underbrace{\frac{j_e}{l} V_{TXPe} \frac{m_{oK}}{\gamma_M}}_{18} \pm \\ & \pm F_3 \underbrace{\frac{j_i}{l} V_{nXmi} \frac{m_{oK}}{\gamma_n}}_{19} \pm F_4 \underbrace{\frac{j_e}{l} V_{nXme} \frac{m_{oK}}{\gamma_M}}_{19} + \\ & + I \underbrace{\frac{dN_K}{dt} \frac{m_K}{S_D \gamma_K} K_{енж}}_{20} + I \underbrace{\frac{dN_n}{2dt} \frac{4/3 \pi r^3 n}{S_D n_a} K_{em}}_{21}, \quad (1) \end{aligned}$$

где:

1. Скорость изменения геометрии за счет распыления ионами.
2. Скорость изменения геометрии за счет распыления атомами перерезрядки.
3. Скорость изменения геометрии за счет распыления электронами.
4. Скорость изменения геометрии за счет радиационно-стимулированной диффузии.
5. Скорость изменения геометрии за счет внедрения ионов.
6. Скорость изменения геометрии за счет внедрения атомов перерезрядки.
7. Скорость изменения геометрии за счет спокойного испарения в вакуум.
8. Скорость изменения геометрии за счет уноса материала в жидкой фазе под действием потоков ионов и электронов.

9. Скорость изменения геометрии за счет уноса материала в жидкой фазе под действием импульсных плазменных и светолучевых потоков.
10. Скорость изменения геометрии за счет конденсации в паровой фазе.
11. Скорость изменения геометрии в результате термоупругого разрушения материала в виде кластеров при действии ионов.
12. Скорость изменения геометрии в результате термоупругого разрушения материала в виде кластеров при действии электронов.
13. Скорость изменения геометрии в результате термоупругого разрушения материала в виде кластеров под действием импульсных плазменных и светолучевых потоков.
14. Скорость изменения геометрии за счет термоусталостного отслаивания для случая действия ионов.
15. Скорость изменения геометрии за счет термоусталостного отслаивания для случая действия электронов.
16. Скорость изменения геометрии за счет термоусталостного отслаивания для случая действия импульсных плазменных и светолучевых потоков.
17. Скорость изменения геометрии за счет действия электродных пятен.
18. Скорость изменения геометрии за счет плазмохимических реакций.
19. Скорость изменения геометрии за счет термохимических реакций.
20. Скорость изменения геометрии за счет попадания материала в капельной фазе.
21. Скорость изменения геометрии за счет подачи материала в виде порошка.

Это выражение определяет производительность процессов нанесения покрытий и размерной обработки. Иногда производительность для этих типов технологических процессов определяют в массовых единицах

$$n = \gamma_m \cdot V_{\Sigma}, \text{ кг/м}^2\text{с.} \quad (2)$$

Производительность (массовая) для технологических процессов образования новых структур, новых сплавов, модификации сплавов и т.п. может быть оценена как

$$n = \gamma_m \frac{S_{am} \Delta l_m [E_i, e, j, i, e]}{S_D t_m}, \text{ кг/м}^2\text{с.} \quad (3)$$

Линейную скорость получим в виде:

$$V_{\Sigma} = \frac{S_{am} \Delta l_m [E_i, e, j, i, e]}{S_D t_m}, \quad (4)$$

где S_{am} – площадь облучаемого материала, в котором происходит необходимое структурное превращение; $\Delta l_m [E_i, j, e]$ – глубина слоя облучаемого

материала, где реализуются необходимые структурные превращения; t_m – время действия потока заряженных частиц, за которое происходят структурные превращения; S_D – площадь обработанной поверхности.

Предложенная методика априорной производительности позволяет без сложных расчетов оценить производительности практически всех технологических процессов, использующих плазменные, ионные и электронные потоки, а так же комбинированные технологии упрочнения режущего инструмента. Примеры реализации лазерно-плазменно-ионной обработки представлены на рис. 17 – 18. Видно, что есть возможность анализировать влияние различных технологических и физических параметров на производительность обработки, а также определить режимы, при которых производительность будет максимальной. При наличии фактора коэффициенты перед соответствующим слагаемым следует приравнять единице, при его отсутствии – нулю, т.е. выражение (1) может быть так же использовано для нахождения диапазона наивыгоднейших, с точки зрения производительности, режимов работы источников заряженных частиц.

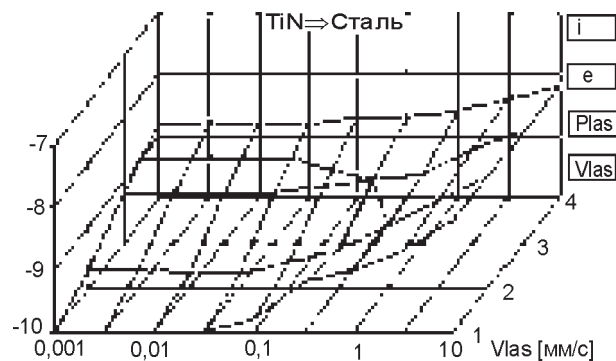


Рис. 17. Влияние различных технологических и физических параметров на производительность обработки.

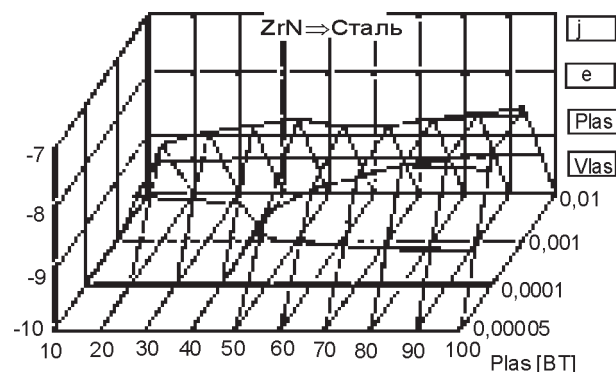


Рис. 18. Влияние различных технологических и физических параметров на производительность обработки.

На рис. 19 представлена зависимость скорости изменения геометрии детали при нанесении покрытия TiN на сталь Р6М5 в зависимости от

энергии ионов азота и плотности ионного тока с результатами экспериментов.

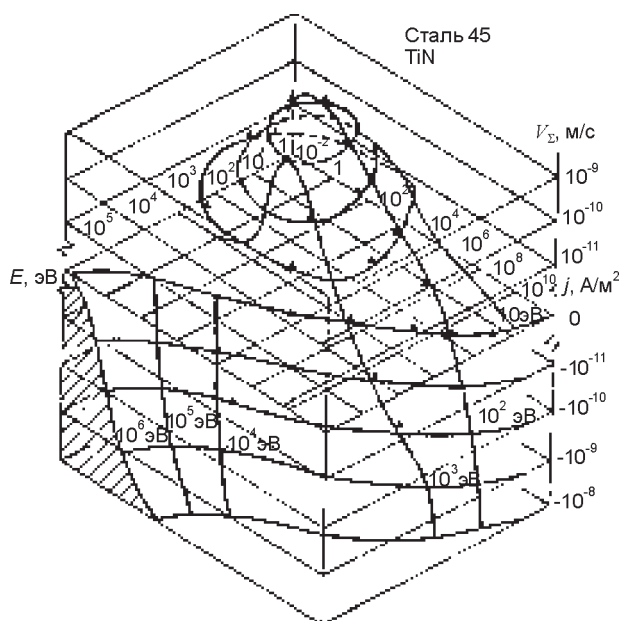


Рис. 19. Скорость изменения геометрии детали при нанесении покрытий, ионной очистке, ионной имплантации и ионном легировании в зависимости от энергии ионов и плотности ионного тока с результатами эксперимента.

При скоростях изменения геометрии больше нуля реализуется нанесение покрытий, при скоростях изменения геометрии равной нулю выгодно проводить процессы упрочнения, а при скоростях меньше нуля реализуются технологические процессы ионного полирования, ионной очистки, ионного фрезерования. На основе экспериментального исследования получены значения скорости изменения геометрии, которые подтверждают полученные теоретические значения и говорят об адекватности модели и эксперимента.

ПОЛУЧЕНИЕ РАВНОТОЛЩИННЫХ ПОКРЫТИЙ

Исследования десятилетней давности показали возможность получения равномерного распределения плотности тока по плоской секционированной подложке. Но получение равнотолщинных покрытий, для рассчитанного распределения плотности ионного тока, не было возможно, так как на периферийное кольцо было необходимо подавать потенциал в 1500 – 1700 В, что приводило к съему материала на нем. Все это и затормозило исследования в области получения равнотолщинных покрытий. Нами было предложено использовать дополнительно к разным потенциалам секционированной подложки разные потенциалы, приложенные на цилиндрические экраны, что позволило при потенциалах на секциях и экранах,

меньше 250 В, получить равномерное распределение плотности тока по радиусу подложки (рис. 20), скорости изменения геометрии

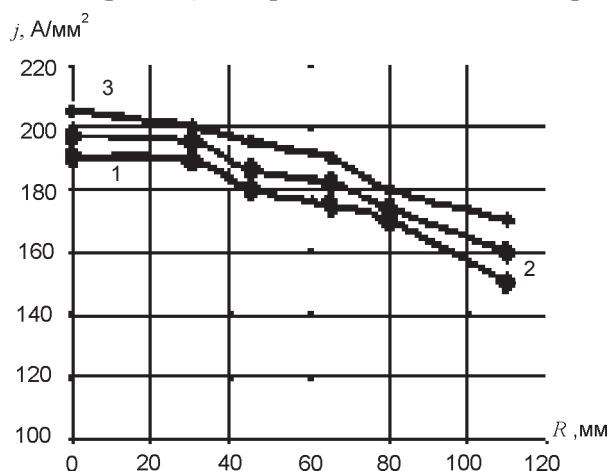


Рис. 20. Зависимости плотности ионного тока на секционированной подложке при различных потенциалах на секциях (U_1, U_2, U_3) и экранах (U_4, U_5, U_6), при работе одного источника различных токах функционирующего магнита. $J_q = 100$ А ($U_1 = -50, U_2 = -100, U_3 = -250, U_4 = -50, U_5 = 50, U_6 = 50$ В). 1. $J_{cp} = 0,2$ А; 2. $J_{cp} = 0,4$ А; 3. $J_{cp} = 0,6$ А.

(рис. 21), полученной по экспериментальным параметрам потока, и распределения толщины покрытия по радиусу, полученной теоретически

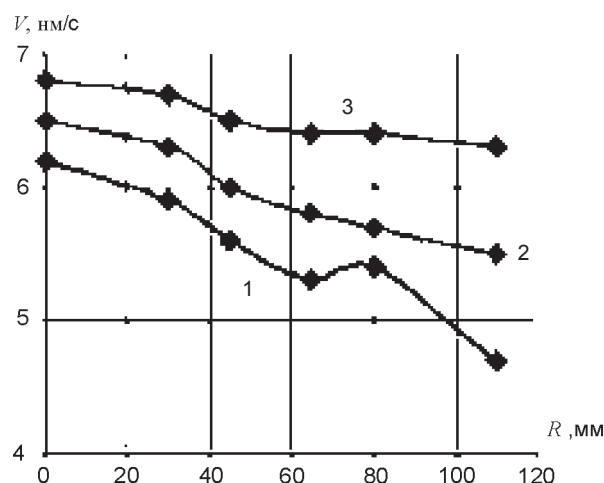


Рис. 21. Теоретическая скорость изменения геометрии детали в режиме осаждения покрытия $V_Σ$ в зависимости от радиуса секционированной подложки для различных потенциалов секций (U_1, U_2, U_3) и экранов (U_4, U_5, U_6), а также токов фокусирующего магнита I_ϕ при работе одного источника ионов. $J_q = 100$ А ($U_1 = -50, U_2 = -100, U_3 = -250, U_4 = -50, U_5 = 50, U_6 = 50$ В). 1. $J_{cp} = 0,2$ А; 2. $J_{cp} = 0,4$ А; 3. $J_{cp} = 0,6$ А.

и экспериментально (рис. 22). Видно, что есть возможность получения равнотолщинных покрытий.

Рассмотрим технические возможности улучшения характеристик упрочненных слоев и покрытий.

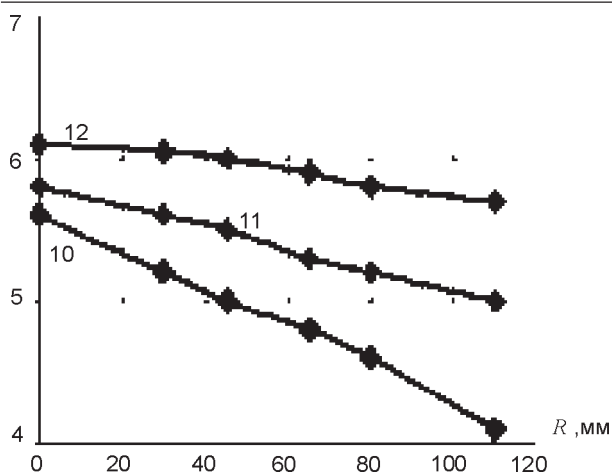


Рис. 22. Зависимость толщины покрытия при действии двух испарителей от радиуса секционированной подложки при различных потенциалах секций (U_1, U_2, U_3) и экранов (U_4, U_5, U_6), а также токов фокусирующего магнита I_ϕ при работе одного испарителя (с учетом распределения нейтральной компоненты). $J_q = 100 \text{ A}$ ($U_1 = -50, U_2 = -100, U_3 = -250, U_4 = -50 \text{ В}$). 1. $J_{cp} = 0,2 \text{ A}$; 2. $J_{cp} = 0,4 \text{ A}$; 3. $J_{cp} = 0,6 \text{ A}$.

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЕНИЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДУЛЬНОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И УПРОЧНЕНИЯ «УКРАИНА-К-3» И ВНЕДРЕНИЕ ЭТОЙ УСТАНОВКИ

Установка позволяет:

- наносить монослойные и многослойные покрытия из чистых металлов, нитридов, карбидов, карбонитридов толщиной $0,5 \div 70 \text{ мкм}$;
- повышать износостойкость деталей в $2 \div 35$ раз, коррозионную стойкость в $1,2 \div 16$ раз, сглаживать шероховатость поверхности;
- повышать предел усталостной прочности в $1,3 \div 2$ раза;
- получать требуемые трибологические характеристики (антифрикционные и фрикционные покрытия);
- получать микротвердость поверхностных слоев до 50 ГПа (в случае применения покрытий из карбонитридов);
- повышать теплостойкость в $1,3 \div 2$ раза;
- увеличивать износостойкость режущего инструмента в $10 \div 50$ раз;
- высокую производительность при нанесении износостойких, защитных и декоративных покрытий;
- упрочнение с помощью ионной имплантации, ионного легирования, лазерной и комбинированной обработки;
- создание поверхностных слоев деталей с заданными свойствами;

- реализацию большого количества упрочняющих технологий в одной установке;
- нанесение покрытий, ионное легирование, лазерное и комбинированное упрочнение;
- высокое качество обработки независимо от квалификации оператора;
- быструю смену технологии и типа обрабатываемых деталей.

Экономическое обоснование приобретения установки:

- высокая производительность при малой стоимости единицы поверхности упрочненной детали;
- минимальная стоимость замены технологии;
- малые затраты при переходе от обработки малоразмерных и средних деталей к обработке длинномерных деталей;
- малое потребление энергии;
- малая металлоемкость конструкции;
- высокая надежность.

Описание установки.

Многофункциональный блок обеспечивает:

- нанесение износостойких покрытий (включает электродуговые испарители и магнетронные системы);
- упрочнение поверхностных слоев посредством ионной имплантации, нанесения нитридов и цианидов, ионного легирования, ионной модификации;
- вакуумную лазерную обработку конструкционных материалов, склонных к окислению при упрочнении на воздухе и в защитных средах;
- комбинированное упрочнение, заключающееся в применении двух или трех упомянутых выше методов обработки (например, нанесение покрытия и ионное легирование, нанесение покрытия и лазерная обработка, нанесение покрытия с одновременной ионной имплантацией и лазерной обработкой, нанесение толстых многослойных покрытий с одновременным лазерным отжигом для устранения остаточных напряжений и другие сочетания).

Модульный принцип построения установки обеспечивает:

- выполнение всех описанных выше типов работ при использовании модулей и сборок рассчитанных на проведение необходимых технологических процессов;
- обработку деталей разнообразных форм и размеров;
- высокое качество обработки независимо от квалификации оператора посредством применения комплексных модулей и соответствующих технологий для конкретного типа деталей.

Трансформируемость установки предоставляет следующие возможности:

- настраивать камеру установки посредством изменения размеров в вертикальной и горизонтальной плоскости;

– трансформировать установку из циклической в полунепрерывную, используя дополнительные камеры в качестве накопительных устройств;
– легко переходить на те или иные средства откачки (масляные, турбомолекулярные, криогенные высоковакуумные насосы, роторные и лопастные вакуумные насосы).

Базовая установка, предназначенная для нанесения плазменно-ионных покрытий (рис. 23), состоит из вакуумной камеры, технологических приспособлений для крепления заготовок, несущей рамы, блока клапанов, средств откачки, блока управления вакуумной системой, силового блока, электродуговых испарителей и компьютерной системы управления технологическими процессами.

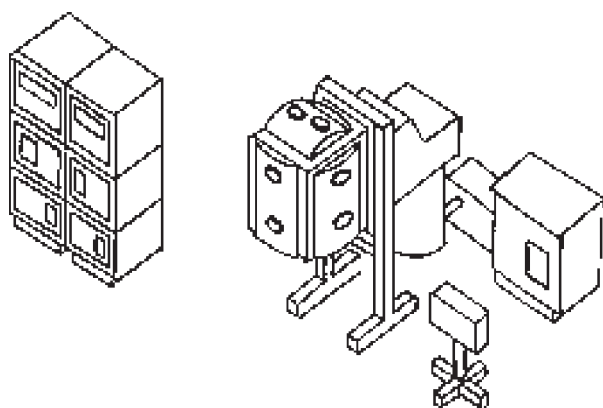


Рис. 23. Базовая установка для нанесения плазменно-ионных покрытий.

Применение блока клапанов позволяет увеличить скорость откачки за счет отсутствия паразитных трубопроводов в вакуумной системе. Базовая установка может быть укомплектована по желанию заказчика комплексными технологическими модулями и дополнительными камерами, а также системой откачки.

Комплексный технологический модуль предназначен для реализации конкретного технологического процесса и состоит из технологических устройств (магнетрон, имплантер, лазер), устройств для напуска рабочей среды, технологических приспособлений для крепления заготовок, регулируемый силовой блок, компьютерный блок управления технологическими процессами, позволяющий проводить обработку в автоматическом режиме для заданного типа технологии.

По требованию заказчика поставляются следующие модули:

- модуль износостойких покрытий (три типа: с дугowymi испарителями, магнетронными источниками, дугowymi испарителями с радиальными плазменными потоками);
- модуль имплантации (два типа: с высоковольтным имплантером и дуоплазмотроном)

– модуль лазерной вакуумной обработки (два типа: с лазером типа ГОИ-100 (КВАНТ 16) и с импульсным лазером типа ГОИ-16).

Особенности вакуумной камеры. Характеризуется малой металлоемкостью (рис. 23). Служит для непосредственной реализации технологических процессов, а также для размещения приспособлений, подающих детали в зону обработки. Состоит из унифицированных стенок, смонтированных на кубическом несущем каркасе, причем одна из стенок служит загрузочной дверью. На каждой стенке имеются два фланца, к которым крепятся испарительные устройства, смотровые окна, приводы вращения и измерительные устройства.

Применение унифицированных устройств позволяет изменить геометрию камеры. Варианты компоновки показаны на рис. 24: а) базовая

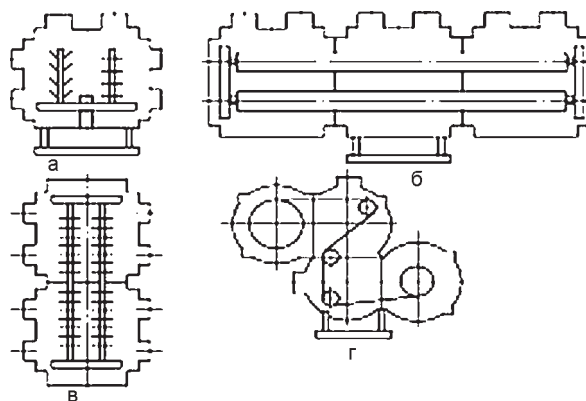


Рис. 24. Варианты компоновки камеры с применением унифицированных устройств.

модель; б) камера для длинномерных деталей; в) вариант шахтной компоновки; г) камера для двустороннего нанесения покрытий на ленты.

Технологические приспособления предназначены для закрепления обрабатываемых деталей. Конструкция приспособлений учитывает форму деталей и их расположение в камере при обработке. Технологические приспособления разрабатываются по требованию заказчика в соответствии с конструкцией заготовок.

Ниже приведены примеры трех типов приспособлений:

- барабанного типа с легко съемными кассетами для упрочнения малоразмерных деталей;
- планетарного типа для упрочнения крупногабаритных изделий типа тел вращения, а также плоских и сложных форм при применении специальных поворотных столов.
- приспособление типа елочки.
- несущая рама обеспечивает крепление и стыковку вакуумной камеры, блока клапанов, вакуумной системы и системы охлаждения.

Блок клапанов представляет собой функционально законченный узел вакуумной аппаратуры. К блоку подсоединяется диффузионный, либо турбомолекулярный, либо криогенный насос и форвакуумный агрегат.

Блок управления вакуумной системой обеспечивает безаварийную последовательность включения элементов откачной системы. Безаварийная работа достигается применением нормально-закрытых вакуумных клапанов. Блок управления монтируется на съемной раме.

Силовой блок (мощностью 15 кВт и напряжением от 0 до 1500 В) служит для питания испарителей, питания магнетронов при магнетронном нанесении покрытий, питания подложки при электродуговом нанесении покрытий, а также в качестве источника тлеющего разряда.

Компьютерная система управления технологическими процессами состоит из специального компьютера на базе микропроцессора, периферийных устройств и исполнительных устройств. Система обеспечивает ввод, запоминание и обработку программы работы блоков по следующим параметрам:

1. Количество и очередность работы испарителей и других технологических устройств.
2. Время очистки.
3. Температура обрабатываемых деталей.
4. Напряжение на подложке или отдельных областях подложки, закон изменения напряжения.
5. Давление и состав реакционных газов, закон изменения давления.
6. Включение вспомогательных систем.
7. Система обратной связи, позволяющая производить регулирование параметров по пунктам 1 – 5.
8. Контроль исправности систем установки.
9. Выдача необходимой информации о прохождении процесса.

Характеристики установок комбинированного упрочнения при исполнении 1, 2, 3 представлены в табл. 5.

Сравнение применения индивидуальных технологий и комбинированных для упрочнения режущего инструмента представлено в табл. 6.

Сравнительный анализ применения индивидуальных и комбинированных технологий для повышения износостойкости представлен в табл. 7.

Сравнительный анализ применения индивидуальных и комбинированных технологий для повышения коррозионной стойкости представлен в табл. 8

Сравнительный анализ применения индивидуальных и комбинированных технологий для повышения усталостной прочности представлен в табл. 9.

Комбинированные технологии обеспечивают создание поверхностных слоев с требуемыми характеристиками. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя при плазменно-ионной обработке (ПИО), ионной имплантации (ИИ), лазерной обработке (ЛО) и ряде комбинированных процессов: плазменно-ионной и лазерной обработке (ПИО+ЛО), ионной имплантации и лазерной обработке (ИИ+ЛО) показано на рис. 25. Путем изменения толщины покрытия, использования многослойных покрытий, изменения энергии и сорта ионов при имплантации, плотности энергии и времени воздействия при лазерной обработке можно получить необходимые виды распределения микротвердости в поверхностных слоях толщиной до 1 мм. Это позволяет обеспечить необходимую износостойкость и предел усталостной выносливости за счет создания слоев с остаточными напряжениями сжатия, а также коррозионную стойкость и другие характеристики детали. Использование лазерной обработки и ионного легирования позволяет производить выборочную обработку отдельных зон детали.

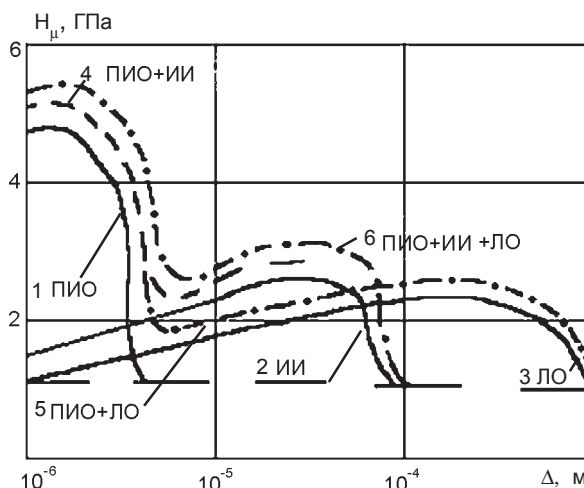


Рис. 25. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя при различных видах обработки. 1. ПИО, 2. ИИ, 3. –ЛО, 4. –ПИО + ИИ, 5. ПИО + ЛО, 6. ПИО + ИИ + ЛО.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены новые физические и технические подходы к упрочнению деталей и режущего инструмента.

Физические:

– получены критические плотности токов, при которых можно рассматривать действие индивидуальных частиц, взаимодействующих частиц и частиц как сплошной среды;

– представлена модель взаимодействия потоков заряженных частиц плазмы и лазерного излучения с конструкционными материалами, позволяющая найти режимы облучения, при которых плотность тока влияет на коэффициент распыле-

Характеристики установок комбинированного упрочнения при выполнении 1, 2, 3

Характеристики установок	Исполнение		
	1	2	3
Производительность при упрочнении инструмента, шт/ч	1100	2200	3300
сверл Ø 5 мм	1100	2200	3300
сверл Ø 10 мм	600	1200	1800
Пластины 2,7 – 12,7 мм	700	1400	2100
Дисковые фрезы Ø 60 мм	380	780	1140
Ресурс службы до кап.ремонта, лет	8	8	8
Площадь активной зоны напыления под одним испарителем, см ²	350 – 50	350 – 50	350 – 50
Общая	1500 – 6000	3000 – 1200	4500 – 1800
Площадь обработки ионным легированием, см ² под одним имплантером	80		
Общая	80 – 160	160 – 320	320 – 480
Под одним дуоплазмотроном	16		
Общая	16 – 32	32 – 64	64 – 96
Количество испарителей, шт.	2 – 6	4 – 12	6 – 18
Количество имплантеров, шт.	1 – 2	2 – 4	4 – 6
Количество лазеров, шт.	1	2	3
Время достижения вакуума	17 – 20	22 – 25	25 – 30
Удельная материалоемкость кг/шт.	1,8 – 2,05	1,7 – 1,9	1,6 – 1,75
Размеры камеры	700Ч700Ч7000	700Ч700Ч1400	700Ч700Ч210
Произ-ть обработки: нанесения покрытия мкм/час	16 – 35	16 – 35	16 – 35
имплантация и ионное легирование			
частиц (м ² /час) имплантером	$(0,5 - 2) \cdot 10^{23}$	$(1 - 4) \cdot 10^{23}$	$(1,5 - 6) \cdot 10^{23}$
дуоплазмотроном	$(1 - 4) \cdot 10^{23}$	$(2 - 8) \cdot 10^{23}$	$(3 - 12) \cdot 10^{23}$
лазерного упрочнения см ² /час			
импульсный лазер ГОИ 16	250 – 5500	500 – 11000	750 – 16500
непрерывный лазер ГОИ 100	6000 – 140000	12000 – 280000	18000 – 42000

ния, когда возможно термоупругое удаление материала (кластерный унос) в зоне действия индивидуальных частиц и термоупругое разрушение материала на периферии потока для случая плотности тока, соответствующей действию потока как сплошной среды, даны условия получения удаления материала в жидкой фазе;

- обнаружено теоретически и экспериментально влияние температурных напряжений на эмиссионные характеристики острых и плоских катодов, а также в электродных пятнах;
- показана возможность объединения плазменно-ионных покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, светолучевой обработки в одной комбинированной технологии, которая позволяет получить упрочненные слои глубиной до одного миллиметра с прогнозируемыми свойствами – с распределенной по глубине микротвердостью, повышенной износостойкостью слоев, улучшенными триботехническими характеристиками;
- проведенные исследования напряженного состояния многослойных покрытий и напряжений в

переходной зоне от покрытия к основному материалу детали позволяют выбирать комбинации покрытий и комбинации покрытие – основной материал, обеспечивающий требуемый знак напряжения и изменения его величины в зоне стыковки слоев. Все это позволяет не только выбирать требуемое многослойное покрытие, а и обеспечить нанесение толстых покрытий с использованием демпфирующих слоев;

- проведенные исследования физических факторов, влияющих на скорость изменения геометрии детали, позволили создать модель производительности процесса нанесения покрытия, очистки, ионного легирования и ионной имплантации, лазерного упрочнения, а также комбинированной обработки на их основе, что дало возможность найти основные параметры потоков, определяющих возможность достижения равнотолщинности покрытий, чему способствовали экспериментальные исследования распределения плотности

Стойкость режущего инструмента при индивидуальных и комбинированных технологиях упрочнения

Технология повышения упрочнения	Инструментальные материалы	Вид упрочнения, покрытия	Вид обработки конструкционных материалов	Относительные стойкости конструкционных материалов		
				исследования	производство	перспектива
ПЮ	Твердые сплавы, быстрорежущие стали	Карбиды, нитриды, карбонитриды	Токарная, сверлильная, фрезерная, зубодолбежная	1,5–9	1,1–1,7	2–10
ИИ+ИЛО	Твердые сплавы, быстрорежущие стали, инструмент. стали	Имплантиция ионов W, Ti, Zr, C, B, N	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбонарезная	1,5–4	1,1–1,6	3–10
	Быстрорежущие стали и инструм. стали, твердые сплавы	Лазерная закалка	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбонарезная	2,1–3	1,5–2	2,3–4
ЭЛО	Быстрорежущие стали, твердые сплавы	Модификация электронным пучком	Токарная, сверлильная	1,4–4	нет	1,7–5
ПЮ+ЛО	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Покрытие, диффузионное проникновение, лазерная модификация	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбонарезная	3–11	нет	7–15
ПЮ+ИЛО	Быстрорежущие стали, твердые сплавы и ионное легирование W, Zr, C, B, N, C, B, п.	Покрытие карбиды, нитриды, и карбонитриды	Токарная, фрезерная, сверлильная	4–12	нет	8–21
ПЮ+ЛО+ИЛО	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Покрытие, диффузионное проникновение ионное легирование и модификация	Точение, сверлильная, фрезерная, резьбонарезная	7–20	нет	10–33
ИЛО+ЛО	Быстрорежущие стали, твердые сплавы	Ионное легирование и лазерная модификация	Точение, сверлильная, фрезерная	5–15	нет	7–20
ЭЛО+ПЮ+ИЛО	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Электронная очистка, плазменно-ионное покрытие + ионное легирование	Точение, сверлильная, фрезерная	7–19	нет	12–25
ПЮ+ИЛО+ЛО+ЭЛО	Быстрорежущие стали, твердые сплавы и лазерная модификация	Электронная очистка, покрытие, ионное легирование	Точение, сверление, фрезерная	8–25	нет	14–37

тока, скорости нанесения покрытия, очистки, ионного полирования и фрезерования, а также физические принципы создания условий для обеспечения равномерного распределения плотности ионного тока в рабочем объеме установки; – приведены результаты исследования влияния на качественные характеристики (износостойкость, стойкость РИ, шероховатость, микротвердость) технологических (физических) и геометрических параметров размещения детали (РИ) в установке, физико-механических характеристик детали до обработки и условий эксплуатации детали и режимов резания для РИ и получение соответствующих закономерностей.

Технические:

– создание многоцелевой модульной трансформирующейся технологической вакуумной установки для комбинированного упрочнения и нанесения покрытий на основе плазменно-ионной, ионно-лучевой и светолучевой обработки; – разработка новых высокопроизводительных испарителей и ионных источников, конструкций устройств и оснастки, обеспечивающих повышение производительности и качественных показателей деталей и РИ; – конструирование рациональных модульных установок с учетом геометрических размеров деталей, их эффективной установки в оснастке и методам обработки (т.е. с учетом используемых технологических модулей);

Износостойкость деталей и РИ при индивидуальных и комбинированных технологиях упрочнения

Технология обработки	Материал деталей	Вид покрытия или упрочнения	Повышение износостойкости, раз		
			в исслед.	на произв.	в персп.
ПИО	Конструкционные стали и сплавы	Покрытия TiN, T, C, MoN, MoC, Cr ₂ N, NbN, WC, B ₂ , ZrO ₂ , HfO ₂	1,3 – 6,8	1,25 – 1,3	1,267
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация N ⁺ , C ⁺ , Ar ⁺ , W ⁺ , Ae ⁺ , B ⁺ , Mg ⁺ , Cu, Na, Sm.	1,2 – 4	1,2 – 1,25	1,5 – 5
ЛО	Конструкционные стали и сплавы	Лазерное упрочнение	1,3 – 4,3	1,2 – 1,3	1,4 – 4,7
ЭЛО	Конструкционные стали	Электронно-лучевое упрочнение	1,5	нет	1,7
ПИО+ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Покрытие: нитриды, карбиды, имплантация: Mo ⁺ , Cu ⁺ , N, W, Zr, Ti.	2 – 10	нет	2,5 – 35
ПИО+ЛО	Конструкционные стали	Покрытие TiN, Al ₂ O ₃ , лазерное упрочнение	2,3 – 3	нет	2,8 – 11
ПИО+ИЛО+ЛО	Конструкционные стали	Покрытие: TiN, MoN, Al ₂ O ₃ , имплантации B, W, C	5 – 8	нет	5,5 – 34
ПИО+ИЛО+ЛО+ЭЛО	Конструкционные стали электронная очистка, лазерное упрочнение	Покрытие: TiN, MoN, имплантация C, W	7 – 10	нет	8 – 35

Таблица 8

Повышение износостойкости за счет применения индивидуальных и комбинированных технологий

Вид обработки	Материал деталей	Вид покрытия	Повышение коррозионной стойкости, раз	
			в исследованиях	на производстве
ПИО	Конструкционные стали и др.	Покрытие TiN, TiN+Al ₂ O ₃ , ZrN	1,2 – 3	1,1 – 2
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация ионов Fe, Ni, Y, B, C, H и др.	1,3 – 1,8	1,1 – 1,3
ЭЛО	Конструкционные стали	Электронно-лучевые покрытия из ZrO ₂ + 3Y ₂ O ₃	1,2 – 1,5	1,1 – 1,2
ЛО	Конструкционные материалы	Лазерное покрытие танталом	1,3 – 1,6	1,1 – 1,2
ПИО+ИЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al ₂ O ₃ ИЛО-имплантация Y	2 – 3	нет
ПИО+ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al ₂ O ₃ ЛО-покрытие Ta	2 – 3	нет
ПИО+ЭЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al ₂ O ₃ ЭЛО-покрытие ZrO ₂ +Al ₂ O ₃	2 – 3,9	нет
ПИО+ИЛО+ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al ₂ O ₃ ИЛО-имплантация Y и C ЛО-покрытие Ta	2,3 – 4	нет
ПИО+ЭЛО+ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие ZrN+Al ₂ O ₃ ЭЛО-покрытие ZrO ₂ +Al ₂ O ₃ ЛО-покрытие Ta	2,1 – 3,7	нет
ПИО+ИЛО+ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+TiC ИЛО-имплантация Y и C ЛО-покрытие Ta ЭЛО-очистка	2,5 – 5	нет

Таблица 9

Повышение усталостной прочности деталей за счет индивидуальных и комбинированных технологий

Технология обработки	Материал деталей	Вид покрытия или упрочнения	Повышение усталостной прочности, раз		
			в исслед.	на произв.	в персп.
ПИО	Конструкционные легированные стали	Покрyтия Ni, Cr, Al, Y	1,15–1,2	нет	1,3–2
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация N	1,12–1,15	нет	1,2–1,8
ЛО	Конструкционные стали	Обработка в режиме с оплавлением	1,1–1,2	нет	1,2–1,9
ПИО	Конструкционные стали	ПИО-покрытие Cr, Ni, Al, Y ИЛО-имплантация	1,3–1,5	нет	1,6–3
ЛО+ПИО	Конструкционные стали	ЛО-обработка в режиме с оплавлением ПИО-порытие Cr, Al, Y	1,25–1,45	нет	1,5–2,5
ЛО+ПИО+ИЛО	Конструкционные стали	ЛО-обработка в режиме с оплавлением ПИО-порытие Cr, Ni, Al, Y ИЛО-имплантация N	1,4–1,7	нет	1,9–4,5

– разработка средств автоматизации и роботизации для установки и перемещения деталей с соответствующими палетами и спутниками, для управления технологическими модулями, а также контрольно-измерительной аппаратурой (для измерения плотности ионного тока, скорости осаждения или очистки, температуры поверхности в зоне обработки и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мацевитый В.М. Покрyтия для режущих инструментов//Харьков: “Высшая школа”.– 1987. – 128 с.
2. Третьяков И.П., Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрyтиями. – М.: Машиностроение. – 1986. – 190 с.
3. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.В. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов – М.: Энергоиздат.– 1987. – 184 с.
4. Коваленко В.С., Меркулов Г.В., Стрижак А.И. Упрочнение деталей лучом лазера. –К.: Техника. – 1981. – 167 с.
5. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Основы лазерного термоупрочнения.– М.: Высшая школа.–1988.– 159 с.
6. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрyтий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. Книга 1.– Харьков: Изд-во АИНУ.– 2002. – 587 с.
7. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрyтий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Справочник для расчета основных физических и технологических

параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. Книга 2. –Харьков: Изд-во АИНУ.– 2002. – 441 с.

8. Мухин В.С., Мингажев А.Р., Смыслов А.М., Абрамов В.Г. Разработки и исследование свойств жаростойких покрyтий в условиях регулярной структуры. – Материалы Всесоюзный НТК “Проблемы обеспечения свойств поверхности, Уфа, 1987. – С. 23 - 29
9. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты //К.: “Выща школа”. – 1986. – 455 с.
10. Костюк Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрyтием и упрочненным слоем.– К.: Изд-во АИНУ. – 2003. – 412 с.
11. Костюк Г.И., Мышелов Е.П. Физические основы создания эффективных электронных, ионных и плазменных технологий //Учебное пособие Минвуз СССР. Харьков.: Изд-во ХАИ.– 1988. – 93 с.
12. Костюк Г.И., Аксенов И.И., Приезжев В.Г., Хороших В.М., Цибин А.С. Плазменное напыление при производстве авиационной техники и режущего инструмента//Учебное пособие Минвуз СССР. Харьков.: Изд-во ХАИ.– 1988. – 103 с.
13. Костюк Г.И., Пылинин О.В. Концепция разработки комбинированных технологий и создания многоцелевых модульных трансформируемых установок //Авиационнокосм. техника и технология. Труды ХАИ, Харьков. – 1994. – С. 147-162.
14. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Выбор упрощенной модели роста островка новой фазы при конденсации пленки//Материалы 5-й Международ. конфер. “Новые технологии в машиностроении”.– Харьков (Украина).–1995. – С. 200 - 201.
15. Костюк Г.И., Кошляков Н.Д. Концепции разработки вакуумных, модульных, трансформируемых, высокоэффективных технологических установок для нанесения покрyтий и упрочнения деталей машин.

- Системы информационного взаимодействия//Сб. науч. труд.– Харьков.: НАНУ, ХВУ.–1995.– С. 37-39.
16. Kostyuk G., Levchenko I. Calculation of thin characteristics//Матер. 5-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении” Изд-во АИНУ, 1996, Харьков. – С. 228 - 231.
 17. Костюк Г.И., Мялища А.К., Левченко И.Г., Некрасов А.А., Горлов А.К. Новые пути создания поверхностных слоев деталей с заданными физико-механическими свойствами//Матер. 5-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении” Изд-во АИНУ, 1996, Харьков, С. 236 - 242.
 18. Kostyuk G., Levchenko I. Model of the initial stage of the condensation and non-continious film growth // Матер. 5-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении”. – Харьков (Украина). – 1996.– С. 261 - 265.
 19. Kostyuk G., Mylitsa A., Gorlov A., et. all. The surface roughness of the detail under the ion implantation and alloying.//Матер. 5-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении”.– Харьков (Украина).– 1996. – С. 280.
 20. Костюк Г.И., Заугольникова И.Л., Кошляков Н.Д. Научные основы управления ионно-плазменным и электронными технологическими процессами, обеспечивающие максимальную производительность, минимальную энергоемкость и высокое качество обрабатываемых деталей//Авиационно-косм. техника и технология. Труды ХАИ, Харьков. – 1996. – С. 448 - 452.
 21. Kostyuk G., Levchenko I. A model of thin film condensation//Proceedinge 17 International Symposium on Discharges and Electrical in sulation in vacuum. USA, 1996. – P. 946 - 950.
 22. Kostyuk G., Levchenko I. A model of thin film condensation//Proceedinge 17 International Symposium on Discharges and Electrical in sulation in vacuum. USA, 1996. –P. 946 - 950
 23. Костюк Г.И., Белоусов А.А., Левченко И.Г., Трушин А.Г. Перспективы создания поверхностных слоев деталей с заданными физико-механическими свойствами//Авиационно-косм. техника и технология. Труды ХАИ, Харьков., 1997. –С. 48 - 53.
 24. Костюк Г.И., Системные научные основы разработки технологических процессов эффективных комбинированных технологий обеспечивающих требуемые качественные характеристики деталей //Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении” Харьков-Рыбачье, 1997. –С. 3 - 20.
 25. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Создание регулярного рельефа на поверхности пленки, наносимой методом конденсации из ионного пучка //Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении” Харьков-Рыбачье (Украина). – 1997. – С. 335 -338.
 26. Костюк Г.И., Баранов О.О. Расчет толщины и пористости ионно-плазменного покрытия //Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении” Харьков-Рыбачье, 1997.– С. 332-335.
 27. Костюк Г.И., Баранов О.О. Математическая модель расчета структуры и химического состава покрытия в зависимости от режима нанесения его на деталь. //Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении” Харьков-Рыбачье, 1997.–С. 322 - 327.
 28. Kostyuk G.I., Belousov A.A., Skorik E.G., Vasilkov P.N. The system scientific bases of the effective plasma-ionic, ionic-beam, laser and combines technological processes development, ensuring required quality characteristics of details of the aviation and rocet-cosmic engineering //Труды Государственного аэро-космического университета. Proceedings 7th inter-national conference “New leading technologies in machine building”, Rybachie, Ukraine, 1998. – P.3-11.
 29. Kostyuk G.I., Pylinin O.V., Skorik E.G. Outlook of oxide-aluminum coatings application for wear resistance increase of the cutting tool//Труды Государственного аэрокосмического университета. Proceedings seventh international conference “New leading technologies in machine building”, Rybachie, Ukraine, 1998. – P. 17 - 23.
 30. Костюк Г.И., Баранов О.О. К расчету твердости фаз внедрения. “Авиационно- косм. техника и технология”//Труды Госуд. аэрокосмического университета. Харьков-Рыбачье, 1998. –С. 406 - 411.
 31. Kostyuk G.I., Baranov O.O. The theoretical aspect of ion technologies as to creation of coating with the improved hardness//Труды Госуд. аэрокосм. универ. Proceedings seventh international conference “New leading technologies in machine building”, Rybachie, Ukraine, 1998. –P. 411 - 421.
 32. Kostyuk G.I., Levchenko I.G. The calculations of surface structures of the thin film applied by method of ionic condensation//Труды Госуд. аэрокосмического университета. Proceedings seventh international conference “New leading technologies in machine building”, Rybachie, Ukraine, 1998. – P. 423 - 425.
 33. Костюк Г.И., Баранов О.О. Теоретические аспекты влияния концентрации атомов внедрения на микротвердость поверхностных слоев//“Авиационно-косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосмического университета. Харьков-Рыбачье, 1998. –С. 425 - 436.
 34. Костюк Г.И., Прогнозирование зависимости микротвердости от технологических параметров установок при плазменно-ионной, светолучевой и

- комбинированной обработке//“Авиационно-косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосм. университета. Харьков-Рыбачье, 1998. – С. 436-446.
35. Kostyuk G.I., Levchenko I.G. Model of the regular microrelief formation on film surface by means of plasma oscillations//“Авиационно-косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосмического университета. Харьков-Рыбачье, 1998. – С. 455 - 459.
 36. Kostyuk G.I., Levchenko I.G. The calculations of surface structures of the thin film begin applied by method of ionic condensation//XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Eindhoven, Volume 1, The Netherlands, 1998. – P. 585.
 37. Kostyuk G.I., Pylinin O.V., Skorik E.G. Outlook of oxide-aluminum coatings application for wear resistance increase of the machines parts and cutting tool//XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Eindhoven, Volume 1, The Netherlands, 1998. – P.588.
 38. Kostyuk G.I., Levchenko I.G. The calculations of surface structures of the thin film begin applied by method of ionic condensation//XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Eindhoven, Vol. 1, The Netherlands, 1998. – P. 585.
 39. Kostyuk G.I., Pylinin O.V., Skorik E.G. Outlook of oxide-aluminum coatings application for wear resistance increase of the machines parts and cutting tool//XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Eindhoven, Vol. 1, The Netherlands, 1998. – P.588.
 40. Kostyuk G.I. The system scientific bases of the effective combined technological processes development, ensuring required quality details characteristics//XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Eindhoven, Vol. 1, The Netherlands, 1998. – P. 700 - 704.
 41. Костюк Г.И., Системные основы разработки технологических процессов эффективных плазменно-ионных, светолучевых и ионно-лучевых технологий, обеспечивающих требуемые качественные характеристики деталей//Труды ХАИ “Авиационно-косм. техника и технология”, Харьков, 1998. – С. 76 - 83.
 42. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Расчеты профилей поверхности пленки, наносимой методом ионной конденсации//Труды ХАИ за 1997г “Авиационно-косм. техника и технология”, Харьков, 1998.– С. 84.
 43. Костюк Г.И., Баранов О.О. К расчету качественных характеристик плазменно-ионных покрытий: микротвердость//“Авиационно - косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосмического университета. Вып.10 Харьков-Рыбачье, 1999. – С. 239-243.
 44. Костюк Г.И., Скорик Е.Г., Белоусов А.А. Выбор оптимальных технологических параметров обработки детали, обеспечивающих максимально возможное значение функции цели и диапазон качественных характеристик детали//“Авиационно - косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосмического университета. – Вып.10. Харьков-Рыбачье, 1999. – С. 246 - 254.
 45. Kostyuk G.I., Levchenko I.G. Model and numerical simulation of thin film structure.//“Авиационно - косм. техника и технология”. – Вып. 10.– 1999. – С. 316 - 320.
 46. Костюк Г.И., Трушин А.Г., Антонова О.О. Концепция создания роботизированных комплексов для плазменно-ионной, ионно-лучевой, светолучевой и комбинированной обработки – нанесение покрытий упрочнение//“Авиационно-косм. техника и технология”. – Вып.11. – 1999. – С. 88 - 92.
 47. Костюк Г.И., Волошко А.Ю., Гулый С.В., Рыбачук Д.В., Чуешов В.И. Концепция создания автоматизированных систем управления технологическими процессами при проведении синтеза лекарственных средств//“Авиационно-косм. техника и технология”. – Вып.11. – 1999. – С. 101 -108.
 48. Костюк Г.И. Комбинированные технологии – реальность и перспективы//Известия Академии инженерных наук Украины. – № 4. – 2000.– С.27- 47.
 49. Костюк Г.И., Баранов О.О. Расчет функции межатомного взаимодействия в металлах и металлоидах//“Авиационно-косм. техника и технология”. – Вып.11. – 1999. – С. 247 - 252.
 50. Костюк Г.И., Син Юань Дун, Шпаковский И.В. Рациональные пути выбора технологических параметров и физико-механических характеристик деталей авиационной техники перед комбинированной обработкой//Известия Академии инженерных наук Украины. – № 1. – 2001. – С. 4 - 9.
 51. Костюк Г.И., Баранов О.О. К расчету качественных характеристик ионно-плазменных покрытий: структурные и термические напряжения//“Авиационно-косм. техника и технология”. – Вып. 17. – Харьков. – 2000.– С. 272 - 276.
 52. Костюк Г.И., Хаджем Ахмед Тавалбех, Шпаковский И.В. Концепция создания комбинированных технологий и разработка высокоэффективных вакуумных модульных трансформируемых многоцелевых технологических установок для упрочнения деталей машин//“Авиационно-космическая техника и технология”. – Вып. 18 – Харьков. – 2000.– С. 3 - 9.
 53. Костюк Г.И., Васильков П.Н. Стойкость режущего инструмента с плазменно-ионным покрытием, после лазерной обработки, имплантации и комбинированного воздействия//“Авиационно-косм. техника и технология”. – Вып 18. – Харьков. – 2000. – С. 26 - 37.
 54. Костюк Г.И., Волошко А.Ю., Гулый С.В. Экспериментальные исследования свойств покрытий, наносимых методом КИВ, в условиях стационарного ВЧ-разряда//“Авиационно-космическая техника и технология”. – Вып 18. – Харьков. – 2000.– С. 213 - 226.
 55. Kostyuk G.I., Vasilkov P.N. The perspective of development of combined technologies with the help of

- ion, electron, luminous and plasma fluxes for the receipt of the improved properties of the surfaces.// Proceedings IX International Conference "New Leading technologies in machine building" Charkov-Rybachie.– 2000. – P. 8.
56. Костюк Г.И., Вовк А.В., Горбенко Г.В., Цегельник Е.В. О некоторых путях управления технологической наследственностью//Proceedings IX International Conference "New Leading technologies in machine building" Charkov-Rybachie.– 2000.–P. 44 - 47.
 57. Костюк Г.И., Пылинин О.В., Сырицкая Т.А. Повышение износостойкости методом ионно-плазменного осаждения релита//Proceedings IX International Conference "New Leading technologies in machine building" Charkov-Rybachie.– 2000. – P. 48 - 51.
 58. Kostyuk G.I., Nyalitsa A.K., Goriov A.K., Trushin A.G., Lobanova L.V., Nelrasov A.A., Antonova O.O., Vasilkov P.N. The surface roughness of the detail the ion-plasma coating end the ion implantation and alloying //Proceedings IX International Conference "New Leading technologies in machine building" Charkov-Rybachie. – 2000. – P. 52 - 58.
 59. Kostyuk G.I., Belousov A., Pylinin O.V. Multifunction modular transformable vacuum plating and strengthening plant//Proceeding nineteenth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China. – 2000. – P. 600 - 604.
 60. Kostyuk G.I. Choice of optimal technological parameters of the combined strengthening on the basis of plasma-ionic, ionic-beam and laser technologies//Proceeding nineteenth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China. – 2000. – P. 682 - 685.
 61. Kostyuk G.I. The perspective of development of combined technologies with help of ion, electron, light-beam and plasma fluxes for the receipt of the improved surface properties//Proceeding nineteenth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China. – 2000.– P. 700-706.
 62. Kostyuk G.I., Levchenko I.G. Model and numerical simulation of thin film structure//Proceedings isdeiv XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China. – 2000. – P. 582 - 585.
 63. Kostyuk G.I. The perspective of development of combined technologies with help of ion, electron, light-beam and plasma fluxes for the receipt of the improved surface properties//Proceedings isdeiv XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China. – 2000. – P.663-666.
 64. Kostyuk G.I. Choice of optimal technological parameters of the combined strengthening on the basis of plasma-ionic, ionic-beam and laser technologies//Proceedings isdeiv XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China. – 2000. – P. 682- 685.
 65. Костюк Г.И. Хуа Линь, Син Юаньдун Перспективы разработки автоматизированных и роботизированных установок упрочнения деталей и нанесения покрытий на основе плазменно-ионной, ионно-лучевой, светллучевой и комбинированной технологии//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Национального аэрокосмического университета. – Вып. 24. – Харьков.– 2001. – С.15-21.
 66. G.I. Kostyuk, Pylinin O.V., Hua Lin Outlook of oxide-aluminum coatings application for wear resistance increase of cutting tool and of detales machine-bilding //Авиационно-косм. техника и технология. Труды Национального аэрокосмического университета.– Вып. 24. – Харьков. – 2001.– P. 138-142.
 67. Костюк Г.И., Син Юаньдун, Антонова О.О. Научные основы выбора многослойных и однослойных покрытий в деталях авиационной техники на основе исследования характера напряженного состояния //Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып. 24. – Харьков. – 2001.– С.159-169.
 68. Костюк Г.И., Пылинин О.В., Касаткина Н.В. Применение барьерного покрытия для режущих инструментов при обработке деталей авиационной техники из титана и его сплавов//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Национального аэрокосмического университета.– Вып. 24. – Харьков. – 2001.– С.170-180.
 69. Костюк Г.И., Волошко А.Ю., Гулый С.В., Левченко И.Г., Романов М.С. Перспективы и реальность применения стационарного ВЧ-разряда для формирования покрытий, наносимых методом КИБ//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Национального аэрокосмического университета.– Вып. 24. – Харьков. – 2001.– С. 282-293.
 70. Костюк Г.И., Антонова О.О., Лобанова Л.В., Васильков П.Н. Методы повышения износостойкости и триботехнических характеристик деталей машин за счет применения различных методов упрочнения //Авиационно-косм. техника и технология. Труды Национального аэрокосмического университета.– Вып. 24. – Харьков. – 2001.– С. 299-315.
 71. Костюк Г.И., Руденко Н.В. Выбор оптимальных технологических параметров обработки деталей с помощью эмпирических зависимостей качественных характеристик, обеспечивающих максимально возможное значение функции цели и диапазон качественных характеристик детали//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Национального аэрокосмического университета.– Вып. 24. – Харьков. – 2001.– С. 329-343.
 72. Костюк Г.И., Хуа Линь, Син Юаньдун Пути выбора технологических параметров и физико-механических характеристик деталей перед комбинированной обработкой//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Национального аэрокосмического университета.– Вып. 25. – Харьков. – 2001.– С. 20-24.
 73. G.I. Kostyuk, Voloshko A.U., Levchenko I.G. Experimental investigation of Unipolar Arcs//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Национального

- аэрокосмического университета.– Вып. 25. – Харьков. – 2001.– Р. 333-335.
74. Костюк Г.И. Хуа Линь, Син Юаньдун Перспективы разработки автоматизированных и роботизированных установок упрочнения деталей и нанесения покрытий на основе плазменно-ионной, ионно-лучевой, светлоручевой и комбинированной технологии//Авиационно-косм. техника им технология. Труды Десятой международной конференции “Новые технологии в машиностроении”, Charkov – Rybachie. – 2001.–С. 15-21.
 75. Baranov O.O., Kostyuk G.I. Improvement of an adhesion strength of plasma-ion coatings by creation of a transient layer between a coating material and fundamentals//Материалы 4-го Международного симпозиума “Вакуумные технологии и оборудование” Харьков, Украина. – 2001.– С. 269-272.
 76. Костюк Г.И., Волошко А.Ю., Гулый С.Б., Левченко И.Г. Исследование влияния стационарного ВЧ-разряда на процесс формирования покрытий, наносимых методом КИБ//Материалы 4-го Международного симпозиума “Вакуумные технологии и оборудование” Харьков, Украина.–2001.–С.239-250.
 77. Kostyuk G.I., Pylinin O.V., Tavalbex X.A. Outlook of oxide-Aluminum coatings application for wear resistance increase of cutting too//Материалы 4-го Международного симпозиума “Вакуумные технологии и оборудование” Харьков, Украина. – 2001.– С. 273-278.
 78. Kostyuk G.I. Technological feasibility’s of combined techniques and then perspectives in Ukraine//Материалы 4-го Международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование» Харьков, Украина, –С.167-174.
 79. Костюк Г.И. О путях создания ионных технологических устройств оптимальной производительности. Современное оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин//Москва, Информэлектро, 1988, с.39
 80. Костюк Г.И., Пылинин О.В. Концепция разработки комбинированных технологий и создания многоцелевых модульных трансформируемых установок //Авиационно-косм. техника и технология. Труды ХАИ, Харьков, 1994, с.147-162
 81. Костюк Г.И., Некрасов А.А., Кошляков Н.Д. Пути разработки эффективных модульных, многоцелевых, трансформируемых, высокоэффективных технологических установок для нанесения покрытий и упрочнения деталей машин//Авиационно-косм. техника и технология. Труды ХАИ, Харьков, 1994. – С. 343-345
 82. Костюк Г.И., Концепция разработки и создания высокоэффективных комбинированных технологий и оборудования с адаптивным управлением, использующих ионные, плазменные, электронные и светолучевые потоки//Материалы 5-й Международ. конф. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков, 1995. – С. 3-17
 83. Kostyuk G.I, Klachchenko V.S., Koshlyakov N.D., Necheporenko A.A., Pylinin O.V. Multifunction modular plant vacuum plating and strengthening plant// Материалы 5-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков, 1995. – С.19
 84. Kostyuk G., Mylitsa A., Pylinin O. Modulic transformable vacuum coating and stengthening plant //В кн.: Матер. 5-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении” Изд-во АИНУ, Харьков, 1996. – С. 29-36
 85. Kostyuk G., Pylinin O., Koshenkov A. et. all. Multifunction modulic transformable vacuum plating (coating) and stengthening plant(unit) “Ukraine-K-3”//Proceedinge 17 Internat-ional Symposium on Discharges and Electrical insulation in vacuum. Berceley, California, USA, 1996. – P. 951-956
 86. Kostyuk G., Pylinin O., Belousov A., Lupkin B. Multifunction modulic transformable vacuum plating and stengthening plant “Ukraine-K-3” (MMTUVNPU Ukraine-K-3)//Материалы 6-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении” Харьков-Рыбачье, 1997. – С. 70-75
 87. Костюк Г.И., Волошко А.Ю., Гулый С.В., Лаврентьев О.А., Маслов В.А. Создание катодного узла с большой эмиссионной способностью как прототипа для электронно-лучевых приборов (ЭЛП) без рентгеновского излучения//“Авиационно-косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосм. универ. – Вып. 11. – Харьков-Рыбачье (Украина). – 1999. – С.1 62-168.
 88. Костюк Г.И., Тавалбех Хаджем Ахмед, Син Юань Дун Перспективы создания эффективных адаптивных систем управления плазменно-ионными, ионно-лучевыми, электронно-лучевыми, светолучевыми и комбинированными технологиями// «Известия Академии инженерных наук Украины». – № 4. – 2000. – С.72-78.
 89. Костюк Г.И., Синь Юань Дун, Васильков П.В Перспективы разработки автоматизированных и роботизированных установок упрочнение деталей и нанесение покрытий на основе плазменно-ионной, ионно-лучевой, светолучевой и комбинированной технологии//«Известия Академии инженерных наук Украины». №1. – 2001. – С. 36-46
 90. Kostyuk G.I., Belousov A., Pylinin O.V. Multifunction modular transformable Vacuum plating (coating) and strengthening plant (unit) //Proceedings isdeiv XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Xi’an, China.– 2000. – P. 600-603.
 91. Костюк Г.И. О влиянии температурных напряжений на эмиссионные характеристики катодного материала//Материалы 7-й Всес. конфер. по генераторам низкотемпературной плазмы. Том 2. Изд-во АН КазССР, Алма-Ата. 1977. – С.144-147
 92. Костюк Г.И. О повышении эмиссии ненакаливаемого катода за счет термоупругого деформирования материала//Тезисы докладов Всес. симпозиума по ненакаливаемым катодам. Изд-во Совета по эмиссионной электронике. АН СССР. Томск.– 1977.– С. 98-99

93. Костюк Г.И. О взаимосвязи термоупругого деформирования эмиссионных и эрозионных процессов в материале холодного катода//Изд-во СО АН СССР. Тезисы докл. 3-го Всесоюзного симп. по сильно-точной импульсной электронике. Томск, 1978.– С.21
94. Костюк Г.И., Некоторые особенности эмиссионных процессов, связанные с действием температурных напряжений//Межвузовский сб. Источники и ускорители плазмы. ХАИ, Изд-во Минвуз СССР. Харьков.– 1978. – Вып. 3.– С. 91-98
95. Костюк Г.И., Белан Н.В. О теоретическом исследовании влияния температурных напряжений на эмиссию электронов//Тезисы докладов Всес. симп. по ненакаливаемым катодам. Изд-во СО АН СССР. Томск. – 1980. – С. 28-29
96. Костюк Г.И. О динамике эмиссионных процессов на острейном катоде//Материалы 18-й Всесоюзной конф. по эмиссионной электронике. Москва Изд-во “Наука”. – С. 235-237
97. Костюк Г.И., Гончаренко М.В. Особенности эмиссионных процессов в катодном пятне дугового технологического источника плазмы//Материалы Всес. конфер. Новые технологии и робототехнические комплексы в производстве авиационной техники. 1990. – Харьков. – С. 10-12
98. Костюк Г.И., Куценко Н.А., Сторчак В.В. Динамика эмиссионных процессов на острейном и плоском катоде//Материалы 38-го Междунар. симп. по полевой эмиссии. Вена (Австрия). – 1991.– Р. 1-11
99. Kostyuk G. The theoretical bases of the emission increase due to thermal stress//Материалы 3-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков. – 1994. – С. 118
100. Kostyuk G., Belousov A., Zaugolnikova I. Dynamics emission processes in spots on cold cathode and flat cathode//Proceedings of 44th International Field Emission Symposium National Research Institute for Metals, Tsukuba (Japan). – 1997. – P.74.
101. Kostyuk G. The theoretical research of temperature stresses influence on the electron emission//XVIIth Inter. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Eindhoven, Netherlands. – Vol. 1.– 1998. – P. 60 - 64.
102. Kostyuk G. The theoretical bases of the emission increase due to thermal stress. “Авиационно - косм. техника и технология”//Труды Госуд. аэрокосмического университета. – Вып.10. – Харьков-Рыбачье (Украина). – 1999. – С. 285-291.
103. Костюк Г.И., Белан Н.В., Пимкин В.А. О пробое, вызываемом действием электронного пучка на поверхность электрода из сплава//ЖТФ.–Т.44, №6 . – 1974.
104. Костюк Г.И., Гайдуков В.Ф., Белан Н.В. Некоторые особенности развития разряда при иницировании его электронным пучком//ЖТФ.– Т. 42, № 6. – 1972.
105. Костюк Г.И., Белан Н.В., Гайдуков В.Ф., Островский Е.К., Стрелков И.В. Об условиях пробоя в вакуумном разряднике с электронным пучком// ЖТФ. – Т. 42, № 2. – 1972.
106. Костюк Г.И., Сысоев Ю.А. Зажигание дуги тлеющим разрядом в технологических источниках плазмы. Ионно-плазменная технология упрочнения изделий инструментального производства//М.: Информэлектро. – 1987. – С. 46 - 48.
107. Костюк Г.И., Сысоев Ю.А. Устройство для зажигания вакуумной дуги в технологическом источнике плазмы. Современное оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин//М.: Информэлектро.– 1988. – С. 8 - 9.
108. Костюк Г.И., Сысоев Ю.А. Способ зажигания дуги в вакуумной установке. Авт. свид. по заявке № 4338901 с приоритетом от 28.10.87 МКИ H05H 1/26. Положительное решение от 29.08.83.
109. Костюк Г.И. О путях создания ионных технологических устройств оптимальной производительности. Современное оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин//М.: Информэлектро. – 1988. – С.39.
110. Костюк Г.И., Васильков П.В., Куценко Н.А. Методика расчета производительности комбинированных технологий с применением ионных, электронных, световых и плазменных потоков//Материалы Всес. семинара “Новые электротехнологические процессы в машиностроении” Кишинев.– 1990.– С. 26 - 27.
111. Костюк Г.И. Модель расчета производительности комбинированной технологии на основе лазерной, плазменно-ионной и электронной технологии//Материалы 15-го Междунар. симп. по разряду электрической изоляции в вакууме. Дармштадт.– 1992.– Т. 2.– С. 41 - 45.
112. Костюк Г.И. Модель расчета производительности комбинированной технологии//Матер. Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков.– 1992.– С. 3 - 21.
113. Kostyuk G., Gorlov S., Trushin A. A model calculating technology productivity on the base of laser plasma ion and beam technologies for obtaining of maximal productivity. Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”, Харьков-Рыбачье (Украина). – 1997.– С. 21 - 47.
114. Костюк Г.И., Белоусов А.А., Грабченко А.И., Скорик Е.Г. Методика прогнозирования производительности ионно-лучевых, плазменно-ионных, лазерных, лазерно-плазменно-ионных и других комбинированных технологий и методика сравнения установок для их реализации//“Авиационно - косм. техника и технология”. Труды Гос. аэрокосм. университета. Харьков. – 1998.– С. 23 - 33.
115. Kostyuk G.I., Shpakovskiy I.V., Tavflbekch X.A. A model of calculating of combine technology productivity on the basis of laser plasma-ion and beam technologies. “Авиационно-ком. техника и технология”// Труды Государственного аэрокосмического университета. – Вып. 17. – Харьков. – 2000.– С.3 -21.
116. Костюк Г.И., Васильков П.В., Горлов А.К., Уильсон Р.А. Методика прогнозирования стойкости режущего инструмента при плазменно-ионной, свето-

- лучевой и комбинированной технологии упрочнения//Материалы 3-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков. – 1994. – С. 38 - 49.
117. Костюк Г.И., Горлов А.К., Васильков П.В., Тавалбех Х.А. Прогнозирование зависимостей микротвердости, шероховатости и адгезии поверхностных слоев от параметров технологических установок при ионно-плазменной, ионной и светолучевой обработке//Материалы 3-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков. – 1994. – С. 52 - 57.
118. Костюк Г.И. Стойкость режущего инструмента с покрытием после имплантации и комбинированного воздействия. Материалы 3-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. – Харьков. – 1994. – С. 58.
119. Костюк Г.И., Козиненко О.В., Васильков П.Н., Кошляков Н.Д. Стойкость режущего инструмента с покрытием, после имплантации, светолучевого и комбинированного воздействия//Авиационно-косм. техника и технология. Труды ХАИ. – Харьков. – 1994. – С. 27-38
120. Костюк Г.И., Г.А. Кривов, Рыжов Э.В., Грабченко А.И., Некрасов А.А., Скорик Е.Г., Касьяненко Т.Н. Прогнозирование качественных характеристик инструментальных и конструкционных материалов после комбинированной обработки в зависимости от технологических параметров установки // В кн.: Матер. 5-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении” Харьков.: Изд-во АИНУ. – 1996. – С. 3 - 27.
121. Kostyuk G., Levchenko I. Calculation of thin characteristics//В кн.: Матер. 5-й Междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении” Харьков.: Изд-во АИНУ. – 1996. – С.228-231.
122. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Прогнозирование качественных характеристик плазменно-ионных покрытий на базе микропараметров формирования покрытий и функций распределения//Авиационно - косм. техника и технология. Труды ХАИ, Харьков. – 1996. – С. 47 - 53.
123. Костюк Г.И., Белоусов А.А., Некрасов А.А., Скорик Е.Г. Прогнозирование технологических параметров плазменно-ионной, ионно-лучевой, светолучевой и комбинированной обработки, обеспечивающих требуемую стойкость инструмента//Авиационно-косм. техника и технология. Труды ХАИ, Харьков. – 1997. – С.54 - 60.
124. Костюк Г.И., Белоусов А.А., Скорик Е.Г., Заугольникова И.Л. Пути повышения стойкости режущего инструмента, износостойкости – его материала и коррозионной стойкости//Авиационно-косм. техника и технология. Труды ХАИ, Харьков. – 1997. – С. 159 - 163.
125. Костюк Г.И., Белоусов А.А., Скорик Е.Г., Пылин О.В., Рыжов Э.В. Перспективы применения покрытия из окиси алюминия для повышения износостойкости деталей машин и режущего инструмента//Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении” Харьков-Рыбачье (Украина). – 1997. – С. 52 - 62.
126. Костюк Г.И., В.Г. Горбенко, Дьяченко В.С. Улучшение быстрорежущих сталей средствами комбинированных технологий, использующих концентрированные потоки энергии//Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении” Харьков-Рыбачье (Украина). – 1997. – С. 352-356.
127. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Создание регулярного рельефа на поверхности пленки, наносимой методом конденсации из ионного пучка//Материалы 6 Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении” Харьков-Рыбачье (Украина). – 1997. – С. 335-338.
128. Kostyuk G., Belousov A., Skorik E., Vasilkov P. The system scientific bases of the effective plasma-ionic, ionic-beam, laser and combines technological processes development, ensuring required quality characteristics of details of the aviation and rocket-cosmic engineering//Труды Государственного аэрокосм. универ. Proceedings 7th international conference “New leading technologies in machine building”. Rybachie (Ukraine). – 1998. – P. 3 - 11
129. Kostyuk G., Levchenko I. Model of the regular micro-relief formation on film surface by means of plasma oscillations// “Авиационно-косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосм. универ. Харьков-Рыбачье (Украина). – 1998. – С. 455-459.
130. Kostyuk G., Levchenko I. The calculations of surface structures of the thin film begin applied by method of ionic condensation//XVIIth Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Vol. 1. – Eindhoven (The Netherlands). – 1998. – P. 585.
131. Kostyuk G., Pylinin O., Skorik S. Outlook of oxidealuminum coatings application for wear resistance increase of the machines parts and cutting tool //XVIIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Vol. 1. – Eindhoven (The Netherlands). – 1998. – P. 588.
132. Kostyuk G. The system scientific bases of the effective combined technological processes development, ensuring required quality details characteristics//XVIIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Vol. 1. – Eindhoven (The Netherlands). – 1998. – P. 700-704.
133. Kostyuk G., Belousov A., Pylinin O. Multifunction modular transformable vacuum plating (coating) and strengthening plant (unit)//Proceeding nineteenth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Xi’an (China). – 2000. – P. 600-604.
134. Kostyuk G.I. Choice of optimal technological parameters of the combined strengthening on the basis of plasma-ionic, ionic-beam and laser technologies//Proceeding nineteenth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Xi’an, China. – 2000. – P. 682 - 685.

135. Kostyuk G. The perspective of development of combined technologies with help of ion, electron, light-beam and plasma fluxes for the receipt of the improved surface properties//Proceeding nineteenth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.– Xi'an (China). – 2000. – P. 700 -706.
136. Kostyuk G.I., Levchenko I.G. Model and numerical simulation of thin film structure//Proceedings isdeiv XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Xi'an (China). – 2000. – P. 582 - 585.
137. Kostyuk G.I. The perspective of development of combined technologies with help of ion, electron, light-beam and plasma fluxes for the receipt of the improved surface properties//Proceedings isdeiv XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Xi'an (China). – 2000. – P. 663-666.
138. Kostyuk G.I. Choice of optimal technological parameters of the combined strengthening on the basis of plasma-ionic, ionic-beam and laser technologies// Proceedings isdeiv XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.– Xi'an (China). – 2000. – P. 682 - 685.
139. Костюк Г.И. Хуа Линь, Син Юаньдун Перспективы разработки автоматизированных и роботизированных установок упрочнения деталей и нанесения покрытий на основе плазменно-ионной, ионно-лучевой, светлочуевой и комбинированной технологии //Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ. – Вып. 24. – Харьков. – 2001. – С.15-21.
140. G.I. Kostyuk, Pylinin O.V., Hua Lin Outlook of oxide-aluminum coatings application for wear resistance increase of cutting tool and of detales machine-bilding //Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ. – Вып. 24. – Харьков. – 2001. – P. 138-142.
141. Костюк Г.И., Воляк Е.А., Снурницин А.В. Теплофизические и термомеханические аспекты лазерно- и плазменно-механической обработки деталей АТ и стойкость режущего инструмента с одно- и многослойным покрытием и упрочненным слоем// Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып. 24. – Харьков. – 2001.– С. 151-158.
142. Костюк Г.И., Син Юаньдун, Антонова О.О. Научные основы выбора многослойных и однослойных покрытий в деталях авиационной техники на основе исследования характера напряженного состояния //Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып. 24.– Харьков. – 2001. – С.159-169.
143. Костюк Г.И., Пылинин О.В., Касаткина Н.В. Применение барьерного покрытия для режущих инструментов при обработке деталей авиационной техники из титана и его сплавов//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып. 24. – Харьков.– 2001. – С.170-180.
144. Костюк Г.И., Антонова О.О., Лобанова Л.В., Васильков П.Н. Методы повышения износостойкости и триботехнических характеристик деталей машин за счет применения различных методов упрочнения. //Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ. – Вып. 24. – Харьков. – 2001. – С. 299-315.
145. G.I. Kostyuk, Voloshko A.U., Levchenko I.G. Experimental investigation of Unipolar Arcs//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып. 25 – Харьков.– 2001.– P. 333-335.
146. Baranov O.O., Kostyuk G.I. Improvement of an adhesion strength of plasma-ion coatings by creation of a transient layer between a coating material and fundamentals// Материалы 4-го Междунар. симпозиума “Вакуумные технологии и оборудование” Харьков (Украина).– 2001.– С. 269-272.
147. Костюк Г.И., Волошко А.Ю., Гулый С.Б., Левченко И.Г. Исследование влияния стационарного ВЧ-разряда на процесс формирования покрытий, наносимых методом КИБ//Материалы 4-го Международного симпозиума “Вакуумные технологии и оборудование” Харьков, Украина.– 2001.– С.239-250.
148. Kostyuk G.I., Pylinin O.V., Tayalbex X.A. Outlook of oxide-Aluminum coatings application for wear resistance increase of cutting tool//Материалы 4-го Междунар. симпоз. «Вакуумные технологии и оборудование» Харьков (Украина). – 2001. – С. 273-278.
149. Kostyuk G.I. Technological feasibility's of combined techniques and then perspectives in Ukraine//Материалы 4-го Междунар. симпоз. «Вакуумные технологии и оборудование» Харьков (Украина).– 2001. – С.167-174.
150. Костюк Г.И. Тепловое и напряженное состояние инструмента с покрытием и упрочненным слоем при плазменномеханической обработке//Материалы 3-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков (Украина). – 1994. – С.166-171.
151. Костюк Г.И., Скорик Е.Г. О взаимосвязи стойкости режущего инструмента с покрытием и его тепловым и напряженным состоянием//Материалы 5-й Междунар.конфер. “Новые технологии в машиностроении” Харьков (Украина). – 1995. – С.190-195.
152. Костюк Г.И., О.В. Мамлюк, Шпаковский И.В. Тепловое и напряженное состояние инструмента с покрытием и упрочненным слоем при плазменномеханической обработке металлических композиционных материалов//«Авиационно-косм. техника и технология». Труды Государственного аэрокосм. универ. «ХАИ». – Вып. 17 – Харьков.– 2000.– С.180 -185.
153. Костюк Г.И., Мышелов Е.П., Пимкин В.А., Ткаченко В.А., Шадов В.П. Теплофизическая аналогия эрозионных процессов действия заряженных частиц материала//В сб. Источники низкотемпературной плазмы. – Вып.2, Из-во ХАИ. – 1973. – С.145-153.
154. Костюк Г.И., Белан Н.В., Мышелов Е.П., Пимкин В.А., Ткаченко В.А. О теплофизической модели эрозионных процессов при действии заряженных

- частиц на металлы//Труды 7-й Междунар. конфер. Разряд и электроизоляция в вакууме. – Новосибирск (Россия). – 1976. – С. 343-346
155. Костюк Г.И., Белан Н.В., Ткаченко В.А. О возможности создания обобщенной теплофизической модели эрозионных процессов при широком изменении плотности тока в электродных пятнах//Материалы 7-й Всес. конфер. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Том 2. Изд-во АН КазССР, Алма-Ата. – 1977. – С. 196-199
156. Костюк Г.И. Модель эрозии при действии потока ионов различной интенсивности и энергии на металлы//Межвузовский сб. Источники и ускорители плазмы. – Харьков (Украина). – 1981. – Вып. 5. – С. 87-96.
157. Костюк Г.И. Критические плотности тока заряженных частиц при рассмотрении модели эрозии //Межвузовский сб. Источники и ускорители плазмы. – Харьков (Украина). – 1981. – Вып. 5.
158. Костюк Г.И. Термомеханические процессы в зоне действия потоков заряженных частиц различной интенсивности и энергии на металлы. //Источники и ускорители плазмы. – Харьков (Украина). – Вып. 7–Межвузовский тематический сб. научных трудов. – 1983. – С. 85-92
159. Костюк Г.И., Белан Н.В., Мышелов Е.П., Тихонов В.Б. Теплофизические и термомеханические процессы при действии потока заряженных частиц и плазмы на металл//Труды 11-го Международного симп. Разряд и электроизоляция в вакууме. – Берлин (Германия). – 1984. – С. 195-198
160. Костюк Г.И., Мышелов Е.П., Тихонов В.Б. Теплофизические, термомеханические и эрозионные процессы в металлах, подвергающихся действию потоков плазмы, ионов и электронов в плазменной технологии//Материалы Международной конфер.: Плазма: Наука и технология. – Пекин (Китай), (препринт). – 1986. – С.631-637
161. Костюк Г.И., Мышелов Е.П., Тихонов В.Б. Теплофизические, термомеханические и эрозионные процессы в металлах, подвергающихся действию потоков плазмы, ионов и электронов в плазменной технологии. //Материалы Международной конфер.: Плазма: Наука и технология. – Пекин (Китай) (препринт). – 1986. – С.631-637
162. Костюк Г.И. Эффективный коэффициент эрозии при действии потоков заряженных частиц и плазмы на металлическую мишень, учитывающий столкновительные, термоупругие, термоусталостные, диффузионные, термохимические и плазмохимические процессы. Теплофизические процессы и технологии авиадвигателестроения //Тематический сб. науч. труд. – Харьков, ХАИ. – 1988. – С. 3 - 22
163. Костюк Г.И. Модель взаимодействия потоков заряженных частиц и плазмы с металлической мишенью, учитывающая столкновительные, теплофизические, термоупругие, термопластические, термоусталостные, диффузионные, термохимические и плазмохимические процессы//8^{ой} Междунар. симпозиум по плазмохимии. – Токио (Япония). – 1987. – С.137-146
164. Костюк Г.И., Мышелов Е.П., Цыбин А.С. О характере распределения температур и напряжений в металлической мишени при действии потоков плазмы различной интенсивности и энергии//8^{ой} Междунар. симпоз. по плазмохимии. – Токио (Япония). – 1987. – С. 146-153
165. Костюк Г.И., Модель взаимодействия заряженных частиц и плазмы с диэлектрическими и металлическими мишенями//Материалы 15-го Междунар. симп. по разряду, электрической изоляции в вакууме. – Дармштадт (Германия). – 1992. – Т. 2. – С. 39 - 40
166. Kostyuk G., Koshlukov N., Kladchenko V. Thermophysical, termo mechanical and erosional processes in metals under the effect of plasma fluxes ion//Proceeding 17 Intern. Sympos. on Discharges and Electrical insulation in vacuum. – Berceley (California, USA). – 1996. – P. 215 - 220.
167. Kostyuk G., Kozinenko O. The model of interaction charged particle and plasma fluxes with metallic detale surface under the combined processing//Proceeding 17 International Symposium on Discharges and Electrical insulation in vacuum. – Berceley (California, USA). – 1996. – P. 829 - 833.
168. Kostyuk G. The distribution of temperature pattern and of stress field on metallic target under the effect of plasma fluxes with different intensity and energy// Proceeding 17 Inter. Sympos. on Discharges and Electrical insulation in vacuum. – Berceley (California, USA). – 1996. – P. 834-838
169. Kostyuk G., Gorlov S., Sergeeva I The model of interaction charged particle and plasma fluxes with metallic detale surfase under the combined processing in planting//Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. – Харьков-Рыбачье (Украина). – 1997. – С. 278 - 283.
170. Kostyuk G., Belousov A. The distribution of temperature pattern and of stress field on metallic target under the effect of plasma fluxes with different intensity and energy in vacuum plating (coating)//Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. – Харьков-Рыбачье (Украина). – 1997. – С. 311-316.
171. Kostyuk G., Belousov A., Trushin A. Termoplastic deformation, erosion and emission processes in cathode spots of vacuum discharge in planting// Материалы 6-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. – Харьков-Рыбачье (Украина). – 1997. – С. 299 -304.
172. Kostyuk G.I., Voliak E. The distribution of temperature pattern and of stress field on metallic details under the effect of electrons, ions and plasmas fluxes with different intensity and energy//Proceedings IX International Conference «New Leading technologies in machine building». – Charkov-Rybachie (Ukraine). – 2000. – P. 3.

173. Kostyuk G.I., Voliak E., Vasilkov P.N. The model of interaction charged particle and plasma fluxes with metallic detail surface under the combined processing taking into collisional, thermophysical, thermoplastic, thermopetioel, diffusive, thermochemical and plasmachevical processes//Proceedings IX International Conference «New Leading technologies in machine building». – Charkov-Rybachie (Ukraine).– 2000. – P. 9
174. Kostyuk G.I., Voliak E. The model of interaction of charged particle and plasma fluxes with metallic part surface under the combined processing taking into account collision, thermo-physical, thermo-elastic, diffusive, and thermo-chemical processes//Proceeding nineteenth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.– Xi'an (China). – 2000. – P. 617-620.
175. Kostyuk G.I., Voliak E. The distribution of the temperature pattern and stress field on metallic details under the effect of electron, ion and plasma fluxes// Proceeding nineteenth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.– Xi'an (China). – 2000. – P. 675 - 677.
176. Костюк Г.И., Белан Н.В., Пимкин В.А. О теоретическом исследовании эрозионных процессов в электродных пятнах. //Источники низкотемпературной плазмы. Харьков. – 1975.– Вып. 1. – С.93 -104.
177. Костюк Г.И. Исследование катодного падения потенциала в импульсном плазменном ускорителе// Межвузовский сб. Источники и ускорители плазмы. ХАИ, Изд-во Минвуз СССР. Харьков.– 1978.– Вып. 3. – С. 85 - 91.
178. Костюк Г.И., Мышелов Е.П. Динамика эрозионных и эмиссионных процессов в катодном пятне//Материалы 15-й Междунар. конф. по явлениям в ионизированных газах. – Минск (Беларусь). – 1981. – Ч.1. – С. 507 - 508.
179. Костюк Г.И., Мышелов Е.П. Взаимовлияние термоупругого деформирования эрозионных и эмиссионных процессов в катодном пятне вакуумного// Труды 11-го Международного симп. Разряд и электроизоляция в вакууме. – Берлин (Германия).– 1984.–С. 191-194
180. Kostyuk G. Fermorlastic deformation, erosion and emission processes in cathode srots of vacuum discharge//Proceedinge 17 International Symposium on Discharges and Electrical in sulation in vacuum. – Berceley (California, USA).– 1996. – P. 210 - 215.
181. Костюк Г.И., Белан Н.В., Пимкин В.А. Ионы, бомбардирующие катод импульсного ускорителя плазмы, и их участие в создании тепловых потоков// ЖТФ.– Т. 43, № 8. – 1973.
182. Костюк Г.И., Белан Н.В., Мышелов Е.П., Пимкин В.А., Ткаченко В.А. Исследование эрозионных процессов в плазменной технике и технологии// Учебное пособие. Изд-во ХАИ. Минвуз СССР. Харьков, 1977. – 64 с.
183. Костюк Г.И., Белан Н.В. Вопросы стойкости электродных материалов, связанные с действием температурных напряжений//Межвузовский сб. Источники и ускорители плазмы. ХАИ, Изд-во Минвуз СССР. Харьков, 1978. – Вып. 4. – С.76 - 82.
184. Костюк Г.И. Модель эрозионных процессов, позволяющая учесть влияние динамики выхода массы на коэффициент эрозии//Межвузовский сб. Источники и ускорители плазмы. ХАИ, Изд-во Минвуз СССР. Харьков, 1980. – Вып. 4. – С. 82 - 86.
185. Костюк Г.И., Оранский А.И. Методика многофакторного априорного прогнозирования ресурса расходного полного катода плазменного ускорителя// Межвузовский тематический сб. трудов. Ис-точники и ускорители плазмы. Харьков, 1985. – С.19-26
186. Костюк Г.И., Кошляков Н.Д., Кладченко В.С. Температурные напряжения при импульсном режиме работы полого катода технологических плазменных установок//Материалы 5-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков, 1995. – С.63 - 64.
187. Костюк Г.И., Кошляков Н.Д., Кладченко В.С. О критериях достижения ресурса электродных систем плазменных технологических устройств//Материалы 5-й Междунар. конфер. “Новые технологии в машиностроении”. Харьков, 1995. – С.66 - 67.
188. Kostyuk G., Trushin A., Kozinenko O. Experrimental research of electron emission under action of elastic and thermoelastic sathode deformation//Proceedings of 44th International Field Emission Symposium National Research Institute for Metals.– Tsukuba (Japan). – 1997. – P. 71-72.
189. Kostyuk G., Trushin A., Belousov A. The theoretical bases of the emission increase due to thermal stress//Proceedings of 44th International Field Emis-sion Symposium National Research Institute for Me-tals. – Tsukuba (Japan).– 1997. – P. 72 - 74.
190. Костюк Г.И., Трушин А.Г., Романенко Е.И. Общий подход к определению ресурса электродов плазменных технологических устройств// “Авиационно-косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосмического университета. Вып.10. – Харьков-Рыбачье (Украина). –1999. – С. 273 - 280.
191. Костюк Г.И., Воляк Е.А., Романенко Е.И., Трушин А.Г. Методика расчета ресурса электродных систем импульсного технологического ускорителя плазмы. //“Авиационно - косм. техника и технология”. Труды Госуд. аэрокосм. универ.– Вып.10 Харьков-Рыбачье (Украина). – 1999. – С. 295 - 311.
192. Костюк Г.И., Воляк Е.А. Динамика теплофизических и термомеханических процессов в системах и ресурс ионно-оптической системы плазменно-ионного ускорителя//«Известия Академии инженерных наук Украины». – № 1. – 2001.–С.118 - 125.
193. Костюк Г.И., Оранский А.И. Методика многофакторного априорного прогнозирования ресурса расходного полного катода плазменного ускорителя//Межвузовский тематический сб. трудов. Источники и ускорители плазмы. Харьков. – 985. – С. 19 - 26.

194. Костюк Г.И. Теоретические основы лазерной обработки и упрочнения деталей авиационной техники //Технологические системы. Научно-технический журнал.– № 2(13)/02, Вып 1.– С. 69-75.
195. Костюк Коэффициенты влияния на качественные характеристики технологических параметров, геометрических параметров размещения деталей, физико-механических характеристик деталей перед обработкой, условий работы деталей при комбинированном упрочнении деталей//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып.32.
196. Пылинин О.В., Костюк Г.И. Способ ионного азотирования//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып.32.
197. Костюк Г.И., Руденко Н.В. Разработка физико-технических основ АРМ технолога для комбинированного упрочнения и нанесения покрытий на детали авиационной техники//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып. 32.
198. Костюк Г.И., Баранов О.О., Волощенко А.С. Научные основы создания пористых покрытий для поглощения электромагнитного излучения//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып.32.
199. Костюк Г.И. Концепция создания автоматизированной интегрированной системы технологического сопровождения упрочняющих технологий. // Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ. – Вып.32.
200. Костюк Г.И., Руденко Н.В. Теплофизические, термомеханические и эрозионные процессы при действии заряженных частиц на детали при комбинированной обработке//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ.– Вып. 33.
201. Костюк, Антонова О.О., Воляк Е.А., Широкий Ю.В. Исследование прочностных характеристик материалов после нанесения покрытий и комбинированного упрочнения//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ. – Вып. 33.
202. Kostyuk G.I., Levchenko I., Romanov M., Voloshenko A. Non-linear effects in thin film formation//Авиационно-косм. техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. универ. Вып.33.
203. Костюк Г.И., Белов Н.Л., Романенко С.А. Изучение закономерностей распределения плотности ионного тока в рабочем объеме технологической плазменно-ионной установки в различных режимах нанесения покрытия//Авиационно-косм. техника и технология. Научно-технический журнал, Харьков.– Вып. 38/3. – 2003. – С. 29 - 41.
204. Костюк Г.И., Решетников В.И., Костюк Е.Г. Исследование распределения плотности ионного тока в рабочем объеме технологической плазменно-ионной установки при различных режимах очистки ионного азотирования, ионной имплантации и ионного легирования//Авиационно-косм. техника и технология. Научно-технический журнал, Харьков. – Вып. 38/3. – 2003. – С. 46 - 52.
205. Костюк Г.И., Воляк Е.А., Широкий Ю.В., Дубнюк С.Н. Методология и результаты исследования температурных полей плоских деталей, нагреваемых сканирующим электронным или лазерным лучом в вакууме//Авиационно-косм. техника и технология. Научно-технический журнал, Харьков. – Вып. 38/3. – 2003. – С. 57 - 71.
206. Костюк Г.И., Воляк Е.А., Белов Н.А., Решетников В.И., Широкий Ю.В. Теоретические методы прогнозирования качественных характеристик деталей и их от технических параметров, физико-механических характеристик деталей и РИ до упрочнения, геометрических параметров размещения РИ в установке, условий эксплуатации и режимов резания выбора вида упрочнения или покрытия//Авиационно-косм. техника и технология. Научн. техн. журнал, Харьков.– Вып.39/4. – 2003. – С. 6 - 21.
207. Kostyuk G.I., Levchenko I.G. Numerical simulation of thin film growth//Авиационно-косм. техника и технология. Научно-технический журнал, Харьков. – Вып. 39/4. – 2003. – С. 30 - 35.
208. Костюк Г.И., Белов Н.Л., Романенко С.А., Решетников В.И. Исследование влияния места размещения детали на плоской подложке на плотность тока при различных углах падения ионов для плазменно-ионной обработки//Авиационно-косм. техника и технология. Научно-технический журнал, Харьков. – Вып.42/7. – 2003. – С. 168 - 173.
209. Костюк Г.И., Белов Н.Л. Температурные напряжения в многослойных и однослойных покрытиях и работоспособность деталей и режущего инструмента//Авиационно-косм. техника и технология. Харьков. – Вып. 37/2. – 2003. – С. 23 - 31.
210. Костюк Г.И., Белов Н.Л., Юаньдун Син. Система адаптивного управления плазменно-ионной обработкой, изменения толщины покрытия и температуры детали в процессе нанесения покрытий// Вестник двигателестроения. Харьков. – Вып. 2/2003. – 2003. – С.168 - 175.
211. Kostyuk G.I., Voliak E.A. Temperature Stresses in Zone of Charged Particles Action and Cluster Destruction of Structural Materials// VIIth Workshop on Plasma-Based Ion Implantation (PBII2003); Proceeding XIIth International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB).– San-Antonio (Texas, USA). – 2003. – P. 217.
212. Kostyuk G.I., Reshetnikov V.I. Critical Current Densities under Action of Charged Particles on the Structural Materials//VIIth Workshop on Plasma-Based Ion Implantation (PBII2003); Proceeding XIIth International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB).– San-Antonio (Texas, USA). – P. 223.
213. Kostyuk G.I., Belov N.I. Investigation of Friction Coefficients on Cutting Tool Material after Combined

- Treat-ment Based of Ion Implantation and Plasma Coating//VIIth Workshop on Plasma-Based Ion Implantation (PBII2003); Proceeding XIIth International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB). – San-Antonio (Texas, USA). – 2003. – P. 228.
214. Kostyuk G.I., Pylinin O.V. Increase of Cutting Durability due to Combined Strengthening by Ion Implantation and Ion Alloying, Plasma-Ion Coating and Laser Modification//VIIth Workshop on Plasma-Based Ion Implantation (PBII2003); Proceeding XIIth International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB). San-Antonio (Texas, USA). – 2003. – P. 232.
215. Kostyuk G.I., Voliak E.A. Model of Charged Particle and Plasma Beam Interaction With Structural Materials//VIIth Workshop on Plasma-Based Ion Implantation (PBII2003); Proceeding XIIth International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB). – San-Antonio (Texas, USA). – 2003. – P. 340.
216. Kostyuk G.I. Automated System of Technological Support of the Combined Treatment Based on Ion Implantation and Ion Alloying, Plasma Coating and Laser Modification//VIIth Workshop on Plasma-Based Ion Implantation (PBII2003); Proceeding XIIth International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB). – San-Antonio (Texas, USA). – 2003. – P. 430.
217. Kostyuk G.I., Levchenko I.G., Baranov O.O. Numerical simulation of coating formation in ion beam assisted deposition// Proceeding 4th International Conference on Asian-European on Plasma Surface Engineering. 5th Korea-Japan Symposium on Plasma and Thin Film Technology. – 2003. – P. 237.
218. Kostyuk G.I., Belov N.I. Investigation of friction coefficient and cutting tool durability after combined treatment based of ion implantation and plasma coating// Proceeding 4th International Conference on Asian-European on Plasma Surface Engineering. 5th Korea-Japan Symposium on Plasma and Thin Film Technology. – 2003. – P. 238.

**ПЕРСПЕКТИВИ ТА РЕАЛЬНІСТЬ
ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ТА НАНЕСЕННЯ
ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ
МАШИНОБУДУВАННЯ ТА В
ІНСТРУМЕНТАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ
(І. ФІЗИЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ)
Г.І. КОСТЮК**

На основі реалізації нових фізичних, технічних і системних підходів до зміцнення деталей машинобудування та різального інструменту показана можливість наукового вибору ефективної технології зміцнення та нанесення моношарових і багатошарових покриттів, забезпечення високої продуктивності обробки й одержання рівнотовщинних покриттів на деталях. Показано можливість істотного підвищення якісних характеристик деталей завдяки комбінованій обробці.

**PROSPECTS AND FEASIBILITY OF
APPLICATION OF THE COMBINED
TECHNOLOGIES OF HARDENING AND
DEPOSITION COATINGS FOR HARDENING
ITEMS IN MECHANICAL ENGINEERING AND
TOOL MANUFACTURING
(I. PHYSICAL AND TECHNICAL ASPECTS)
G.I. KOSTYUK**

New physical and technical approaches to the strengthening of machine parts and cutting tools permit a scientific choice of the effective technology for strengthening, deposition of single- and multi-layer coatings providing for highly productive and manufacturing coatings of equal thickness of items. The opportunity to improve significantly the qualitative characteristics of the parts due to the combined treatment is demonstrated.