

A method for determining the residual life of auto-mobile units (on the example of automobile engines) is proposed and approved, which is characterized by less laboriousness and satisfactory forecast accuracy.

УДК 621.791.7: 621.785: 621.793

Поболь И. Л.

МЕТОДЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. ОПЫТ ОСВОЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Введение. Методы высокоэнергетической обработки материалов во многих случаях обеспечивают радикальное повышение характеристик поверхностных слоев изделий из всех металлических материалов, используемых в промышленности, а также изготовление соединений, которые невозможно получить с применением традиционных технологий. Несмотря на то, что такие методы изучаются уже достаточно продолжительное время и показали свою экономическую эффективность, степень их использования предприятиями страны оставляет желать лучшего.

Одновременно благодаря созданию научных и технологических основ применения таких перспективных высокоэнергетических методов появляются и бурно развиваются технологии, которые признаны краеугольными для формирования «Индустрии 4.0». К их числу правомерно отнести аддитивные технологии, прежде всего использующие послойное выращивание изделий из металлов.

1. Электронно-лучевые (ЭЛ) методы обработки материалов. Наиболее широкое применение в мире мощные источники ЭЛ нагрева нашли при выплавке особо чистых материалов с изготовлением слитков массой до нескольких десятков тонн, получении соединений с глубиной шва до 200–300 мм в ответственных изделиях, нанесении покрытий испарением материалов и их осаждением на изделия.

Методы ЭЛ обработки обладают целым рядом технологических преимуществ перед другими вариантами плавки, сварки и поверхностного воздействия: высокая точность и воспроизводимость подачи энергии; отсутствие окисления и обезуглероживания материала изделия; высокая надежность электромагнитной системы перемещения луча, возможность автоматизации управления процессом; высокий КПД нагрева (более 75%); возможность использования одного оборудования для проведения различных технологических процессов – сварки, поверхностной закалки, плавления, послойного выращивания заготовок и др.

Основными параметрами обработки, которые определяют характер реализуемого ЭЛ процесса, являются ускоряющее напряжение, ток луча, удельная мощность, длительность нагрева или скорость перемещения луча [1]. Управление технологическими процессами реализуется благодаря формированию требуемого температурного поля в заготовке путем варьирования параметрами потока электронов. Применяется ЭЛ оборудование с использованием пушек как с косвенным накалом катода, так и с плазменными источниками электронов [2].

Сварка. В ФТИ НАН Беларуси разработаны технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) изделий из материалов в широких диапазонах температур плавления (от алюминия до ниобия) и толщин материалов (от 2–3 до 200 мм). Совместно с ОАО «МТЗ», ОАО «Амкор», ОАО «БелАЗ» и другими предприятиями разрабатываются конструкции сварных соединений узлов, изготавливаются экспериментальные и промышленные партии изделий типа шестерен, валов, блок-шестерен.

Проведены исследования влияния параметров ЭЛ воздействия на геометрию шва и морфологию поверхности соединений тонколистовой (2 мм) меди М1. Получены соединения с шириной шва от 2 до 6 мм и выпуклостью шва с обратной стороны (провисанием) в пределах 180–300 мкм. Образование неровностей на поверхности сварных швов связано главным образом с кристаллизационными слоями (рисунок 1 а). Увеличение тока фокусировки позволяет уменьшить высоту неровностей, вносимых процессом кристаллизации металла, до 10–15 мкм. При использовании предварительного подогрева заготовки лучом высота неровностей не превышает 2 мкм (рисунок 1 б).

Полученные при обработке режимов ЭЛС сплава меди послужили основой для изготовления по заказу ОИЯИ партии резонаторов из особо чистого ниобия (рисунок 1 в) для нужд строящихся ускорителей частиц класса мега-сайенс [3]. Одной из задач при ЭЛС была минимизация величины провисания шва в связи с необходимостью получения гладкой внутренней поверхности в резонаторе.

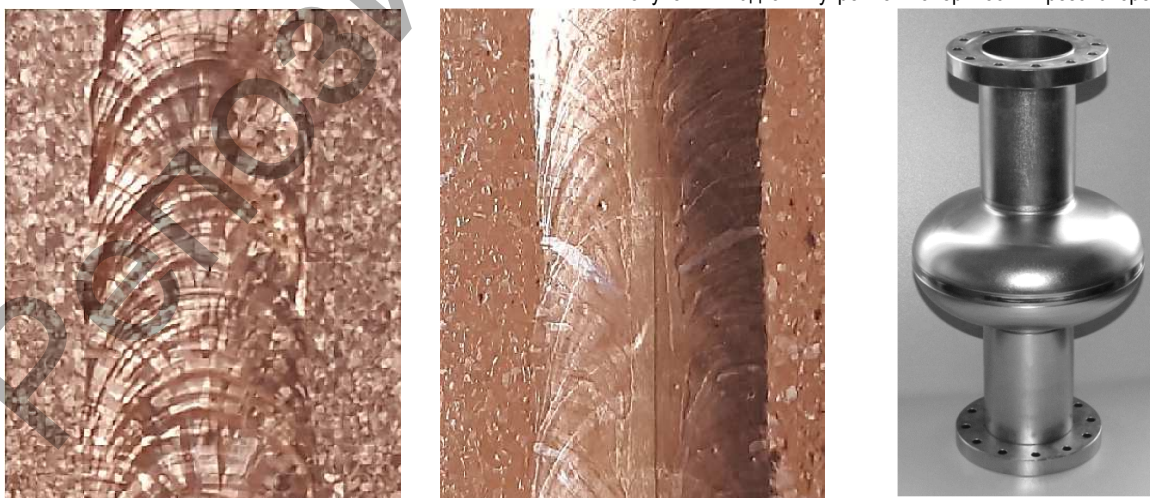


Рисунок 1 – Образцы и изделие, полученные ЭЛС: обратная поверхность сварных соединений меди М1, изготовленных с использованием различных режимов, $\times 10$ (а, б) и эллиптический СВЧ резонатор из особо чистого ниобия (в)

Поболь И.Л., д. т. н., доцент, нач. отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы Физико-технического института НАН Беларуси, e-mail: pobol@phti.by.
Беларусь, г. Минск, ул. Академика Купревича, 10/2.

Модифицирование поверхности. Исследованы варианты упрочнения изделий из конструкционных, инструментальных и подшипниковых сталей, чугунов и титановых сплавов в режимах закалки из твердого и жидкого состояний, комбинированными и совмещенными методами.

ЭЛ закалка выполняется скоростным нагревом поверхности изделий с плотностью энергии $10^2\text{--}10^4$ Вт/см², что обеспечивает высокие скорости нагрева и самоохлаждения материала ($10^3\text{--}10^5$ °C/с). Такая обработка приводит к упрочнению материала на глубину 0,1–2 мм. Степень упрочнения составляет 3,6–3,7 для исходно отожженных сталей и 1,5–1,7 для предварительно объемно закаленных. Твердость сталей достигает HRC 65–68, микротвердость – 10–11 ГПа.

Комбинированные методы инженерии поверхности связаны с наплавкой на основу из сталей и титановых сплавов износостойкого или антифрикционного материала, осаждением покрытий, позволяющих значительно повысить эксплуатационные характеристики изделий [1,4]. Используются различные методы предварительного осаждения покрытий (электродуговых, газотермических, электролитических, детонационных и др.). В исходном состоянии им часто присущи высокая пористость, малые прочность самого слоя, его адгезия к основе и износостойкость. ЭЛ обработка таких покрытий приводит к благоприятным структурным и фазовым превращениям в покрытии и в основе, релаксационным процессам в дефектном материале покрытия, формированию переходной диффузионной зоны, повышению прочности сцепления и плотности покрытий, износостойкости и жаростойкости и других характеристик. ЭЛ обработка предварительно нанесенных на титановые сплавы плазменных покрытий TiO₂ и Ni-Ti, электролитических Cr и Ni, детонационных WC-Ni и WC-Co приводит к образованию между основой и покрытием диффузионной зоны, повышению твердости, адгезионной прочности, предела выносливости, износостойкости поверхностных слоев по сравнению как со сплавами без покрытий, так и со слоями без ЭЛ обработки. ЭЛ оплавление упорядочивает кристаллическую структуру электродуговых покрытий Ni-Al на стали 3, снижает пористость с 15% до 1% и ниже. Устраняются границы между слоями, отдельными частицами, в зоне соединения с основой образуется диффузионная зона из твердых растворов и интерметаллидов. Прочность сцепления слоев с основой увеличивается в 15–20 раз по сравнению с исходным состоянием, износостойкость и коррозионная стойкость – в 2–3 раза. ЭЛ оплавление нанесенных на сталь 3 газотермических покрытий толщиной ~800 мкм из смеси порошков ПГ10H04 и WC-Co (полученного из отходов твердого сплава ВК6) [5] формирует практически беспористую структуру, повышает адгезию покрытия к основе. ЭЛ нагрев сталей, предварительно подвергнутых ХТО, увеличивает толщину диффузионного слоя в 1,5–2,5 раза и его твердость.

Аддитивные технологии послойного выращивания изделий ЭЛ наплавкой. Опыт по формированию одно- и многослойных композиций путем последовательного ЭЛ расплавления добавляемых материалов послужил основой для создания аддитивных технологий. Исследуемый нами метод послойной наплавки проволоки обеспечивает высокую скорость выращивания изделий при низкой стоимости и доступности материала по сравнению с использованием сферических порошков, позволяет получать изделия больших размеров [6]. Отрабатываются варианты выращивания различных по сложности заготовок из проволок нержавеющей стали LNM 304LSI аустенитного класса (рисунок 2), стали EnD0tec DO*15 мартенситного класса, низкоуглеродистой стали СВ-08Г2С ферритного класса, титана BT1-0, сплава алюминия CastoMag 45803.

Определен характер влияния основных параметров ЭЛ нагрева на геометрические параметры наплавляемого слоя. Увеличение тока луча от 5 до 60 мА при постоянной скорости перемещения зоны наплавки ведет к росту толщины наплавляемого за один проход слоя от 5 до 15 мм и уменьшению его высоты от 5 до 0,2 мм. Показана возможность управления размерами заготовки изменением тока луча. Отрабатываются методы выращивания сложнопрофильных изделий путем смещения наплавляемых слоев друг относительно друга в горизонтальной плоскости [7]. Показана возможность изготовления тонкостенных заготовок со смещением слоев до 0,5 мм при использовании проволоки диаметром 1,2 мм и толщине слоев 4 мм.



Рисунок 2 – Фрагмент восьмигранной трубы, выращенный из проволоки LNM 304LSI на подложке из стали 12X18H10T после механической обработки

Достигнут суммарный угол поворота выращенных слоев до 30 градусов относительно начального наплавленного слоя. Полученный опыт позволил изготовить образец типа «винт» высотой 120 мм. Путем последовательного накопления смещений слоев может быть получен угол поворота 180, 360 градусов или любой другой угол.

2. Ионная химико-термическая обработка материалов. Разработаны научные основы технологий ионной химико-термической обработки (ХТО) деталей из сталей, чугунов, титановых сплавов и создания ресурсосберегающего оборудования. Технологии ионной ХТО позволяют повысить стабильность результатов упрочнения, в 3–4 раза сократить производственные затраты и длительность изготовления изделий. Ионная ХТО, по сравнению с газовыми процессами в печи, обеспечивает сокращение продолжительности обработки в 2–5 раз, расхода рабочих газов в 20–100 раз, электроэнергии в 1,5–3 раза, устранение повышенной хрупкости слоя. В качестве рабочей среды при ионной ХТО применяются газовые смеси. Независимое управление расходом каждого из компонентов газовой смеси и давлением в камере позволяют формировать на изделиях из разных марок сталей азотированные слои заданного состава, глубины и твердости. Все этапы работы полностью автоматизированы, оборудование обеспечивает широкий спектр технологических программ [8–10].

Ионное азотирование (ИА) сталей. Процесс ИА реализуется при температурах 450–600 °C в газовой среде, состоящей из азота, аргона и водорода. Свойства упрочненного слоя при ИА (твердость приповерхностного слоя до HV 1100, его глубина до 0,4–0,5 мм, профиль микротвердости по глубине и другие характеристики) зависят от химического состава стали или чугуна и управляются благодаря возможности управления процессом насыщения изменением параметров процесса.

Ионное азотирование титановых сплавов. Разработан метод ИА титана BT1-0, сплавов OT4-1 и BT6. На поверхности сплавов формируются нитридные фазы Ti₂N и TiN, что приводит к повышению твердости и износостойкости сплавов. Микротвердость у поверхности образцов составляет HV_{0,01} 650–910, глубина азотированного слоя – 80–160 мкм [10,11].

Ионная цементация сталей. В ФТИ НАН Беларуси создан экспериментальный образец установки, разработаны процессы ионной цементации (ИЦ) сталей – насыщения их поверхности углеродом в газовой среде при температуре 900–1020 °C. В качестве среды используется аргон, водород, ацетилен. При ИЦ в граничном слое детали создается высокий градиент концентрации углерода, недостижимый при газовой цементации. Скорость роста слоя достигает 0,4–0,6 мм/ч, что в 3–5 раз превышает показатель для других способов цементации. Продолжительность процесса получения слоя глубиной 1,0–1,2 мм сокращается с 9–11 ч до 2–3 ч, а глубокие слои (3,5–5 мм) формируются за время 12–15 ч в зависимости от температуры процесса.

Оборудования для ионной ХТО. На изготавливаемых в ФТИ НАН Беларуси промышленных установках имеется возможность



Рисунок 3 – Некоторые виды изделий, упрочняемых методом ионного азотирования



Рисунок 4 – Промышленное оборудование для ИА в ОАО «БелАЗ» (а) и экспериментальное в БарГУ (б)

проведения поверхностного упрочнения садки деталей массой от килограммов до нескольких тонн, как крупногабаритных изделий, так большого количества мелких деталей (рисунок 3).

Промышленное оборудование и технологии ионной ХТО поставлены в ОАО «МЗКТ», ОАО «МАЗ», ОАО «БелАЗ», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «Могилевлифтмаш», УЧНПП «Технолит» (г. Могилев), ЗАО «Волжский дизель», АО «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии» (г. Волгодонск, Россия), используется для обучения в УО «БарГУ» и УО «БНТУ» (рисунок 4).

В инжиниринговом центре ФТИ НАН Беларуси имеются 4 комплекса ионной ХТО (ИА и ИЦ), в том числе для бездеформационной обработки деталей длиной до 3200 мм. Проводятся работы в рамках хозяйственных договоров по ионной ХТО деталей для значительного количества предприятий.

3. Электрохимическая обработка

Электролитно-плазменное полирование (ЭПП) металлов. Процесс анодного ЭПП углеродистых и нержавеющей сталей, алюминия, титана, магния, цинка и их сплавов протекает при возникновении коммутационного режима, который характеризуется периодическим образованием парогазовой оболочки вокруг изделия. Из-за высокой локальной напряженности электрического поля происходит частичная ионизация газа с протеканием электрического тока через парогазовую оболочку в виде импульсных и диффузных электрических разрядов.

Наибольшая их вероятность возникает на микровыступах поверхности детали. Удаление материала с них приводит к полированию поверхности с возможностью достижения шероховатости $Ra = 0,01$ мкм. ЭПП обеспечивает отсутствие механического воздействия на изделие, возможность обрабатывать детали сложного геометрического профиля, использования недорогих водных растворов с низкими концентрациями малотоксичных химических веществ. В одном технологическом цикле сочетаются процессы обезжиривания, снятия заусенцев, притупления острых кромок, удаления искаженного поверхностного слоя и полировки поверхности изделия. Процесс ЭПП широко используется для финишной обработки медицинских имплантатов.

Высоковольтное электрохимическое окисление (ВВЭО) является перспективным, имеющим преимущества перед традиционными, вариантом окисления сплавов алюминия [13]. Процесс осуществляется в слабых водных растворах кислот. ВВЭО обеспечивает возможность формирования оксидных слоев толщиной до 100 мкм с микротвердостью до HV 670, требуемой шероховатостью поверхности в диапазоне $Ra=0,05-2,0$ мкм, структурой с контролируемыми размерами нанопор от 20 до 240 нм, высокими коррозионной и износостойкостью.

При повышении плотности тока в диапазоне 1–5 А/дм² растет толщина покрытия (рисунок 5 а), однако несколько снижается интегральная микротвердость материала слоя (рисунок 5 б). Рост

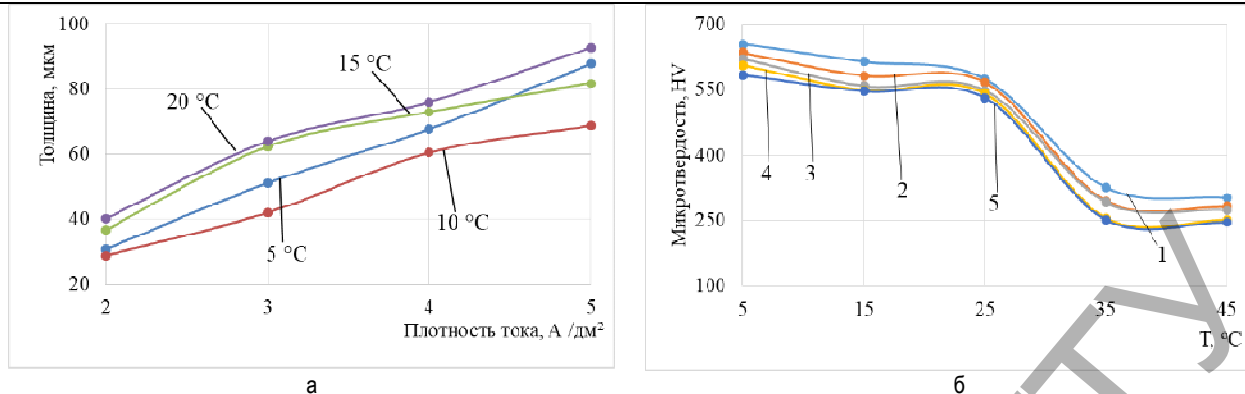


Рисунок 5 – Зависимость толщины оксидных покрытий в сплаве $AlMg_2$ от плотности тока, полученных в течение 30 мин при разных температурах электролита, содержащего $C_4H_6O_6$ и H_2SO_4 (а) и микротвердости материала покрытий от температуры электролита, содержащего H_3PO_4 , H_3BO_3 и $C_2H_2O_4$, полученных в течение 60 мин при разных плотностях тока: кривая 1 – 1 A/dm^2 ; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5 A/dm^2

температуры электролита сопровождается повышением толщины и снижением микротвердости материала слоя, весьма интенсивным при превышении критического значения, для различных сплавов от 25 до 45 °C. Снижение значений микротвердости связано с ростом размеров нанопор и плотности их размещения в слое из-за повышения интенсивности протекания процессов травления керамики при повышении плотности тока и температуры электролита.

Формирование оксидных слоев на поверхности сплавов алюминия перспективно для применения как в традиционных, так и в новых областях – при создании солнечных батарей, инфракрасных излучателей, сенсоров, корпусов смартфонов, заготовок печатных плат на металлической основе с оксидным изолирующим слоем и других изделий.

4. Нанесение плазменных покрытий. Современные многослойные покрытия с наноразмерной структурой выполняют разнообразные функции – адгезионную, барьерную, противозносную, антифрикционную и удовлетворяют гамме требований (обеспечение низкого трения, высокой износостойкости и др.) при соблюдении высокой прочности межслойной адгезии и снижении уровня внутренних напряжений. Разработана серия многослойных, многокомпонентных покрытий толщиной 0,2–5,0 мкм, представляющих собой комбинацию тонкопленочных слоев или нанокмозиты из тугоплавких металлов, их нитридов, карбидов, карбонитридов, оксикарбонитридов, обладающих высокой термической стабильностью [14]. Покрытия имеют высокодисперсную поликристаллическую структуру со средними размерами зерен ~15–50 нм. В зависимости от режимов нанесения доля карбидной фазы составляет 15–30 % для покрытий системы Ti-TiN-TiNCO-TiCO и 6–20% для покрытий системы Ti-TiCO. С увеличением доли карбидной фазы в поверхностном слое покрытий их микротвердость возрастает до 25 ГПа.

Накоплен опыт разработки технологий осаждения покрытий различных составов на инструмент, детали машиностроения, а также создания оборудования для их реализации. Для ОАО «ТАИМ» (г. Бобруйск) на базе стандартной промышленной установки УВНИПА-1-001 изготовлено современное оборудование с возможностью осаждения перспективных композиций. Такие покрытия стабильно обеспечивают повышение стойкости фрез, сверл, разверток и т. п. от 2 до 5 и более раз по сравнению инструментом без покрытий.

Разрабатываются комбинированные технологии инженерии поверхности. Они включают, в частности, создание в приповерхностном слое основного материала детали плавного распределения механических свойств от твердой поверхности к более пластичной сердцевине. В случае ионного азотирования толщина такого слоя может составлять от десятков микрометров до 0,4–0,5 мм, а после цементации и нитроцементации – 1,0–1,2 мм (при необходимости и до 4–5 мм). Нанесенное на вердую поверхность высоко- или сверхтвердое покрытие (с микротвердостью от 20–40 ГПа до 60–85 ГПа) может обеспечить чрезвычайно низкий коэффициент трения (для слоя алмазоподобного углерода – 0,1 и ниже). Такое комбинированное упрочнение придает изделиям необходимую конструкционную

прочность, позволяет создавать на рабочей поверхности детали слои, обладающие высокой твердостью, износостойкостью, контактной выносливостью и усталостной прочностью при изгибе, низким коэффициентом трения.

Заключение. Электронно-ионно-плазменные технологии в Беларуси можно использовать с большой эффективностью практически на всех предприятиях машиностроительного профиля. Широкое внедрение является важным фактором повышения конкурентоспособности продукции на внешних рынках. В целом в стране этим направлениям уделяется недостаточно внимания.

Предлагаются комплексные решения задач инженерии поверхности – технологические работы, консультации по выбору материала, проектирование и изготовление оборудования и технологической оснастки. Разрабатываются и оптимизируются энергосберегающие технологии получения соединений и модификации поверхности изделий.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шипко, А. А. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А. А. Шипко, И. Л. Поболь, И. Г. Урбан. – Минск: Наука і тэхніка, 1995. – 280 с.
2. Antonovich, D. Plasma emission systems for electron- and ion-beam technologies / D. Antonovich, V. Gruzdev, V. Zaleski, I. Pobol, P. Soldatenko // High Temperature Material Processes. – 2017. – Vol. 21. – № 2. – P. 143–159.
3. Поболь, И. Л. Создание сверхпроводящих ниобиевых резонаторов для ускорителей частиц / И. Л. Поболь, С. В. Юревич // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 2. – С. 44–50.
4. Алехнович, В. Н. Электронно-лучевая обработка материалов / В. Н. Алехнович, А. В. Алифанов, А. И. Гордиенко, И. Л. Поболь. – Минск: Беларус. наука, 2006. – 319 с.
5. Поболь, А. И. Триботехнические свойства газотермических покрытий на основе самофлюсующегося сплава никеля и отходов твердого сплава после электронно-лучевого оплавления / А. И. Поболь, Г. Г. Горанский, В. И. Жорник // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов. – Минск: ФТИ НАН Беларусі, 2016. – Кн. 2. – С. 219–225.
6. Залеский, В. Г. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий / В. Г. Залеский, И. Л. Поболь, А. А. Бакинский, А. Д. Губко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63. – № 2. – С. 169–180.
7. Zaleski, V. Wire based electron beam additive manufacturing of blocks and complex shape parts / V. Zaleski, I. Pobol, A. Bakinski, A. Gubko, A. Burin // Electrotechnica and Electronica. – 2018. – Vol. 53. – № 3–4. – P. 55–60.
8. Босьяков, М. Н. Промышленное применение упрочняющей обработки деталей машин и механизмов методом ионного азотирования / М. Н. Босьяков, Д. В. Жук, О. И. Назарова, И. Л. Поболь // Сварщик. – 2011. – № 5. – С. 28–33.

9. Bosyakov, M. N. Nitrogen transfer during ion nitriding / M. N. Bosyakov, A. A. Kozlov, I. L. Pobol // Inżynieria Powierzchni. – 2015. – Vol. 20. – N 3. – P. 3–9.
10. Саханько, С. А. Эффективность применения метода ионного азотирования для упрочнения изделий из стали 13X14H3B2ФР-Ш / С. А. Саханько, М. Н. Босьяков, М. В. Нерода // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов. – Минск: ФТИ НАН Беларуси. – Кн. 2. – 2018. – С. 235–243.
11. Лук'яненко, О. Г. Поліпшення антифрикційних властивостей титанового сплаву ВТ6 / О. Г. Лук'яненко, І. М. Погрелюк, І. Л. Поболь, В. С. Труш, С. М. Лаврись // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2018. – Т. 54. – № 1. – С. 38–45.
12. Поболь, И. Л. Исследование формирования упрочненных слоев на титановых сплавах методом ионно-плазменного азотирования / И. Л. Поболь, И. Г. Олешук, А. Н. Дробов, Сун Фун, Ван Лин // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64 (в печати).
13. Nmadu, D. Feature of formation of aluminium oxide coatings in sulphuric and tartaric acids using high voltage electrochemical oxidation (HVEO) / D. Nmadu, I.L. Pobol, A.A. Parshuto // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов. – Минск: ФТИ НАН Беларуси. – 2015. – Кн. 2. – С. 245–252.
14. Stepanova, E. A. Physico-mechanical properties of the Cr-C and Mo-C coatings / E.A. Stepanova, I.L. Pobol, J. Rajczyk // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 750–752. – P. 1959–1962.

Материал поступил в редакцию 03.01.2018

POBAL I. L. Methods of high energy treatment of materials. Experience of development in the industry

The results of work focused on the development of investigations in the real sectors of high technology and industry are presented. The effect of concentrated energy beams and fluxes of electrons, plasma, and ions in the modes of obtaining materials joints, improving the properties of surface layers provides drastically new properties of products, primarily made of metals. The results of studies performed using such sources recently are considered.

УДК 538.9

**Лявшук И. А., Лиопо В. А., Хвисевич В. М.,
Овчинников Е. В., Веремейчик А. И., Никитин А. В.**

СВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕБАЯ С ПАРАМЕТРАМИ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ

Введение. В классической термодинамике молярная теплоемкость вещества при постоянном объеме имеет значение $C_V^u = 3R$, где $R = 8,31441 \text{ Дж} / (\text{К} \cdot \text{моль})^{-1}$ и называется универсальной газовой постоянной. Однако $C_V^u = \text{const}$ лишь при уменьшении температуры лишь до определенного ее значения. При $T = \theta_D$, C_V^u с понижением температуры начинает монотонно уменьшаться. θ_D названа дебаевской температурой. Следовательно, при $T < \theta_D$ классическое описание термодинамических процессов в кристалле необходимо заменить на другое, которое соответствует квантовой теории. Величина θ_D связана с другими дебаевскими параметрами, например, с дебаевской частотой ω_D . Эта частота зависит от структурно-химических параметров вещества и анализ этой зависимости явился целью исследования в представленной работе.

Классическая теория теплоемкости. В классической теории теплоемкости атомы моделируются абсолютно жесткими упругими шарами, которые имеют три степени свободы движения. При температуре $T > \theta_D$ на одну степень свободы движения такого атома приходится энергия $E = kT$. Так как в одном моле число атомов равно A (числу Авагадро), то один моль вещества «содержит» энергию [1]:

$$E = 3AkT = 3RT. \quad (1)$$

Теплоемкость при постоянном объеме, когда тепловая энергия не расходуется на совершение работы, молярная теплоемкость C_V^u , которая равна $C_V^u = dE / dT = 3R = 24,94 \approx 25 \text{ Дж} / \text{К} \cdot \text{моль}$.

Квантовая теория теплоемкости. Развитие криогенных техно-

логий позволило уже в начале XX века открыть эффект сверхпроводимости и изучить изменения теплоемкости $C_V^u = f(T)$ при низких температурах [2, 3]. На рисунке 1 приведена экспериментальная зависимость C_V^u от температуры.

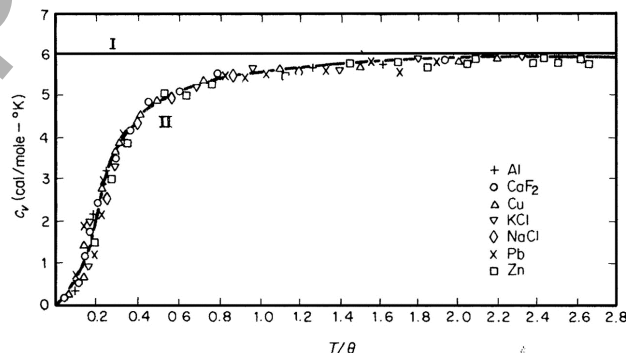


Рисунок 1 – Обобщенная зависимость $C_V = f(T / \theta_D)$ [3]

Для объяснения $C_V^u = f(T)$ $T < \theta_D$ А. Эйнштейном и П. Дебаем примерно в одно и то же время независимо друг от друга были рассмотрены квантовые модели [2, 4].

Оба этих ученых отмечали, что при $T < \theta_D$ атомы нельзя рассматривать как шарики (или точки). Каждый атом является квантовым осциллятором со своим волновым числом (q) и, следовательно, со своей частотой (ω). А. Эйнштейн исходил из предположения о гомологичности атомов и считал, что все атомы, как квантовые ос-

Лявшук Ирина Александровна, ст. преподаватель кафедры информационных систем и технологий, магистр природоведческих наук Гродненского государственного университета им. Янки Купалы; e-mail: ilavshuk@grsu.by.

Лиопо Валерий Александрович, д. физ.-мат. н., профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета им. Янки Купалы; e-mail: liopo@grsu.by.

Овчинников Евгений Витальевич, д. т. н., доцент, доцент кафедры логистики и методов управления Гродненского государственного университета им. Янки Купалы, e-mail: ovchin@grsu.by.

Никитин Александр Викторович, к. т. н., доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета им. Янки Купалы; e-mail: nic@grsu.by.

Беларусь, 230023, г. Гродно, ул. Ожешко, 22.