

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
"ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ"

№ 2(70), 2012

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Горынин И. В., Бурханов Г. С., Фармаковский Б. В. Перспективы разработок конструкционных материалов на основе тугоплавких металлов и соединений 5
- Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Исследование рекристаллизации аустенита стали 09ХН2МД в условиях горячей прокатки методом релаксации напряжений 16
- Добрынина М. В., Филимонов Г. Н., Павлов В. Н. Влияние режима окончательной термической обработки на структуру горячедеформированной аустенитной стали марки 08Х18Н10Т 25
- Орыщенко А. С., Уткин Ю. А., Петров С. Н., [Нестерова Е. В.] Михайлов-Смольняков М. С. Исследование изменения структуры, фазового состава и механических свойств сплава 45Х26Н33С2Б2 при высокотемпературных испытаниях на длительную прочность металла центробежно-литой трубы 33
- Шаболдо О. П., Виторский Я. М. Термомеханическое упрочнение титанового β-сплава ТС6 45
- Легостаев Ю. Л., Осокин Е. П., Калинин Г. Ю., Тепленичева А. С. Новые конкурентоспособные ГЦК-сплавы для криогенных танков судов-газовозов 54
- Гуревич Ю. Г., Чудинова Е. А., Овсянников В. Е. Исследование структуры чугуна после закалки из жидкого состояния 59

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Васильев А. А., Колбасников Н. Г., Соколов С. Ф., Соколов Д. Ф., Хлусова Е. И. Экспериментальное исследование и моделирование кинетики статической рекристаллизации трубных сталей 64
- Карзов Г. П., Теплухина И. В., Голод В. М., Гюлиханданов Е. Л. Моделирование процесса закалки крупногабаритных заготовок из реакторных сталей на основе адаптации информационного обеспечения к производственным условиям 74

МЕТАЛЛОКОМПОЗИТЫ

- Белошенко В. А., Спусканюк В. З., Дмитренко В. Ю., Чижко В. В., Сенникова Л. Ф., Непочатых Ю. И. Структура и свойства волокнистого композита Cu–Cu: размерные эффекты, температурная и временная стабильность 90
- Алеутдинова М. И. Характеристики зоны контакта металлических композитов в условиях сухого трения и протекания электрического тока 102

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Бреки А. Д., Васильева Е. С., Максимов М. Ю., Чулкин С. Г. Исследование нагрузочной способности смазочных композиций с наночастицами WS₂ и WSe₂ для железнодорожных втулок 109

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Беляев С. Н. Исследование особенностей диффузионной сварки в вакууме телескопических соединений на примере «сплошного» ротора бескарданного электростатического гироскопа. 114

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

- Гуленко А. Г., Бучатский А. А., Марголин Б. З., Каштанов А. Д., Федорова В. А. Исследование скорости роста трещины в аустенитных сталях при длительном статическом нагружении в условиях ползучести 120
- Попова И. П., Орыщенко А. С., Марголин Б. З. Расчетно-экспериментальное исследование кинетики трещины при ползучести в дугообразном образце из сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 900°С 138

Виноградов О. П., Гусев М. А., Ильин А. В. Разработка методики определения критического угла раскрытия трещины СТОА как характеристики сопротивления магистральному вязкому разрушению металла трубопроводов.....	150
Ильин А. В., Садкин К. Е. Определение конструктивной и технологической концентрации напряжений в сварных узлах при оценках усталостной прочности оболочечных конструкций.....	161
РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Пирогова Н. Е. Анализ эффекта флакса нейтронов применительно к радиационному охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР.....	177
Светухин В. В., Кадочкин А. С., Рисованый В. Д. Модель выхода гелия из облученного порошка карбида бора под оболочку поглощающего элемента реактора ВВЭР.....	196
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ, МЕХАНИЗМОВ, КОНСТРУКЦИЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ	
Андронов Е. В., Виноградов С. Е., Орыщенко А. С., Пименов А. В., Тимофеев В. Н. Проблемы и перспективы утилизации стружечных металлических отходов.....	203
Корниенко В. М. Параметры зарождения направленной трещины для разрезания металла.....	209
ХРОНИКА	
100 лет ОАО «ЦНИИ материалов».....	221
Легостаев Ю. Л. Освоение морского пути по Северному Ледовитому океану и создание корпусных материалов и средств их коррозионно-эрозионной защиты при эксплуатации ледоколов и стационарных морских ледостойких буровых установок.....	224
Рефераты публикуемых статей	227
Авторский указатель	239
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей.	
Правила для авторов.....	241

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 669.018.29

Перспективы разработок конструкционных материалов на основе тугоплавких металлов и соединений. Горынин И. В., Бурханов Г. С., Фармаковский Б. В. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 5–15.

На основе фундаментальных физико-химических исследований определены некоторые подходы к разработке новых конструкционных материалов и покрытий с заданными свойствами для ракетно-космической, авиационной и атомной техники. Дано обоснование перспективности этих материалов и технологий их производства.

Ключевые слова: конструкционные материалы, тугоплавкие металлы и соединения, перспективы применения.

УДК 669.15–194.56:621.78.011

Исследование рекристаллизации аустенита стали 09ХН2МД в условиях горячей прокатки методом релаксации напряжений. Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 16–24.

Кинетика рекристаллизации аустенита с различным средним размером исходных зерен исследована на низкоуглеродистой стали 09ХН2МД методом релаксации напряжений при изотермической выдержке после деформации сжатием. С помощью термомеханического симулятора Gleeble 3800 определены инкубационные периоды и время завершения процессов. С учетом технологических ограничений при «дробных» схемах горячей прокатки исследуемой стали основным механизмом формирования структуры аустенита является статическая рекристаллизация в паузах между последовательными обжатиями. В случае частичной динамической рекристаллизации деформируемого аустенита характер релаксации напряжений при последующей выдержке позволяет выявить характерные признаки метадинамической рекристаллизации.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, горячая прокатка, кинетика рекристаллизации, метадинамическая рекристаллизация.

УДК 669.15–194.56:621.78:621.73

Влияние режима окончательной термической обработки на структуру горячедеформированной аустенитной стали марки 08Х18Н10Т. Добрынина М. В., Филимонов Г. Н., Павлов В. Н. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 25–32.

Исследованы влияние режимов термической обработки на структуру аустенитной стали 08Х18Н10Т после горячей деформации ковкой и возможность исправления неудовлетворительной структуры, сформировавшейся в ходековки, на стадии термической обработки.

Ключевые слова: горячедеформированная аустенитная сталь,ковка, термическая обработка, формирование структуры.

УДК 669.018.4:620.178:539.4

Исследование изменения структуры, фазового состава и механических свойств сплава 45Х26Н33С2Б2 при высокотемпературных испытаниях на длительную прочность металла центробежно-литой трубы. Орыщенко А. С., Уткин Ю. А., Петров С. Н., Нестерова Е. В., Михайлов-Смоляков М. С. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 33–44.

Исследованы изменения структуры, фазового состава и механических свойств сплава 45Х26Н33С2Б2 при высокотемпературных испытаниях на длительную прочность в температурном интервале 800–1100°С. Обнаружено образование G-фазы $Ni_{16}Si_7Nb_6$, установлен температурный интервал ее стабильности. Установлена корреляция прочностных свойств с образованием на межкристаллитных границах G-фазы.

Ключевые слова: сплав 45X26H33C2B2, центробежно-литая труба, структура, фазовый состав, механические свойства, межкристаллитные границы, G-фаза.

УДК 669.295:621.78

Термомеханическое упрочнение титанового β -сплава ТС6. Шаболдо О. П., Виторский Я. М. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 45–53.

Исследована эффективность различных схем термомеханической обработки (холодного волочения, скоростного нагрева и старения) титанового β -сплава ТС6 при использовании его для изготовления упругих элементов различного назначения, в частности винтовых пружин сжатия и кручения.

Ключевые слова: титановый β -сплав, термомеханическая обработка, пружинный материал.

УДК 669.225.5:629

Новые конкурентоспособные ГЦК-сплавы для криогенных танков судов-газовозов. Легостаев Ю. Л., Осокин Е. П., Калинин Г. Ю., Тепленичева А. С. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2 (70), с. 54–58.

Приведены результаты исследования физико-механических свойств перспективных криогенных сплавов российского производства и их зарубежных аналогов при температурах 20 и –180 / –196°С.

Ключевые слова: сжиженный природный газ; ударная вязкость; криогенные материалы; алюминивно-магниевые сплавы; сплав инвар; сталь аустенитного класса, легированная азотом; суда-газовозы.

УДК 669.131:621.785.6

Исследование структуры чугуна после закалки из жидкого состояния. Гуревич Ю. Г., Чудинова Е. А., Овсянников В. Е. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 59–63.

Исследована структура чугуна с различным содержанием углерода после охлаждения из жидкого состояния. Определены условия, при которых могут быть получены доэвтектический, эвтектический и заэвтектический чугуны. Подтверждена линейная зависимость между относительной износостойкостью и твердостью чугуна. Установлено, что глубина слоя белого чугуна после наплавления зависит от тепловой мощности и температуры нагрева. Абразивный износ белого чугуна, закаленного из жидкого состояния, соизмерим с износом хромистого чугуна.

Ключевые слова: жидкий чугун, эвтектика, закалка, износостойкость.

УДК 669.15–194.56:620.186.5

Экспериментальное исследование и моделирование кинетики статической рекристаллизации трубных сталей. Васильев А. А., Колбасников Н. Г., Соколов С. Ф., Соколов Д. Ф., Хлусова Е. И. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 64–73.

Проведено экспериментальное исследование кинетики статической рекристаллизации аустенита для трубных сталей X80, X90 и X100, а также стали АБ-1, значительно отличающейся по химическому составу. Все исследования выполнены с использованием термомеханического комплекса Gleeble 3800. Разработана количественная математическая модель статической рекристаллизации аустенита, учитывающая эффект комплексного легирования такими элементами как С; Мn; Si; Ni; Mo; Nb; Ti и V при условии, что они находятся в твердом растворе. По точности расчета разработанная модель превосходит все существующие в настоящее время аналоги и может быть рекомендована для анализа кинетики процесса в современных трубных сталях.

Ключевые слова: аустенит, статическая рекристаллизация, моделирование, трубные стали.

УДК 669.15–194:621.039.53:621.785.6

Моделирование процесса закалки крупногабаритных заготовок из реакторных сталей на основе адаптации информационного обеспечения к производственным условиям. Карзов Г.

П., Теплухина И. В., Голод В. М., Гюлиханданов Е. Л. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 74–89.

Приведены результаты численных экспериментов по моделированию закалки крупногабаритных стальных заготовок и их верификации. Эти данные послужили основой для разработки комплексной методики формирования информационного обеспечения компьютерного моделирования процессов термической обработки, адаптированного к производственным условиям их реализации. Формирование информационного обеспечения основано на сочетании термодинамического моделирования реакторных сталей, дилатометрического анализа фазовых превращений и термического анализа теплообмена (в условиях производства). Определение температурно-зависимых теплофизических характеристик закалочных агрегатов выполнено путем решения обратной задачи теплообмена.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, информационное обеспечение расчетов, кинетика выделения фаз, расчет температурных полей, прогнозирование структурообразования и механических характеристик, граничные условия теплообмена.

УДК 621.763:669.35:539.216.1

Структура и свойства волокнистого композита Cu-Cu: размерные эффекты, температурная и временная стабильность. Белошенко В. А., Спусканюк В. З., Дмитренко В. Ю., Чишко В. В., Сенникова Л. Ф., Непочатых Ю. И. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 90–101.

Исследована структура и физико-механические свойства Cu–Cu композита в зависимости от диаметра волокон в интервале от 17 нм до 550 мкм. Установлен экстремальный характер зависимостей физико-механических свойств исследованных композитов и критический размер волокон, при котором наблюдается их максимальное значение. Показано, что полученные наноструктурные волокнистые композиты характеризуются высокой временной и температурной стабильностью свойств.

Ключевые слова: пакетная гидроэкструзия, медь, наноструктура, размер волокон, стабильность свойств.

УДК 621.763:621.891

Характеристики зоны контакта металлических композитов в условиях сухого трения и протекания электрического тока. Алеутдинова М. И. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 102–108.

Представлены металлографические изображения поверхностных слоев металлических композитов после трения при контактной плотности тока более 50 А/см² без смазки. Показано, что в этих условиях ток, обусловленный электроразрядами, преобладает над током, протекающим через фактические пятна контакта. Установлено, что стадия катастрофического износа для металлических модельных композитов наблюдается при плотности тока более 200 А/см². Начало катастрофического изнашивания сопровождается изменением характера токовых зависимостей электрических параметров – контактного падения напряжения, электропроводности зоны контакта, тока на пятнах фактического контакта и отношения электроразрядного тока к току на пятне контакта. Трение без смазки при контактной плотности тока более 50 А/см² вызывает насыщение поверхностного слоя кислородом и углеродом. Отмечено, что содержание металлических компонентов в поверхностном слое ниже по сравнению с их содержанием в шихте.

Ключевые слова: скользящий электроконтакт, спеченный композит, плотность тока, микроструктура, оже-спектры, вольтамперная характеристика, интенсивность изнашивания, поверхностный слой.

УДК 621.892

Исследование нагрузочной способности смазочных композиций с наночастицами WS₂ и WSe₂ для железнодорожных втулок. Бреки А. Д., Васильева Е. С., Максимов М. Ю., Чулкин С. Г. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 109–113.

Исследованы смазочные композиции на основе масла И-40А с мелкодисперсными добавками графита, геомодификатора трения (ГМТ), наночастицами дисульфида и диселенида вольфрама при концентрации частиц до 1 мас. %, проведена оценка влияния типа материала добавки на

нагрузку сваривания жидких смазочных композиций. Испытания проводились на четырехшариковой машине трения ЧШМ-3,2. Проведен сравнительный анализ с ранее полученными трибологическими характеристиками смазочных композиций на основе масла МС-20. Полученные жидкие дисперсные системы на основе масел могут быть использованы для формирования самосмазывающихся поверхностей путем пропитки пористых материалов.

Ключевые слова: смазочные композиции, мелкодисперсные добавки, наночастицы, трибологические характеристики.

УДК 621.791.18

Исследование особенностей диффузионной сварки в вакууме телескопических соединений на примере «сплошного» ротора бескарданного электростатического гироскопа. Беляев С. Н. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 114–119.

Рассматриваются технологические аспекты проектирования процесса диффузионной сварки в вакууме телескопических соединений с возможностью регулирования и управления процессами микропластического деформирования соединяемых деталей. В работе представлены методики расчета термомеханического цикла сварки, обоснованы принципы управления характером и величиной осесимметричных деформаций и предложены конкретные технические решения практической реализации процесса диффузионной сварки телескопических соединений. Показаны области практического использования разработанных технологических схем при изготовлении реальных узлов гироскопов, в частности «сплошного» ротора бескарданного электростатического гироскопа.

Ключевые слова: диффузионная сварка в вакууме, телескопическое соединение, «сплошной» ротор, бескарданный электростатический гироскоп, армирующий элемент, микропластическая деформирование.

УДК 669.15–194.56:539.421

Исследование скорости роста трещины в аустенитных сталях при длительном статическом нагружении в условиях ползучести. Гуленко А. Г., Бучатский А. А., Марголин Б. З., Каштанов А. Д., Федорова В. А. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 120–137.

На основании обработки большого объема экспериментальных данных по сталям аустенитного класса 304 и 316 определены коэффициенты в уравнении скорости роста трещины от C^* -интеграла при ползучести. С целью анализа применимости данного уравнения для отечественных аустенитных сталей выполнены исследования скорости роста трещины для основного металла, сварного шва и зоны термического влияния сталей 10X18H9 и 08X16H11M3 в исходном (аустенизированном) состоянии и после длительного теплового старения. Предложен способ учета теплового старения при расчете скорости роста трещины в условиях ползучести.

Ключевые слова: ползучесть, скорость роста трещины, C^* -интеграл, основной металл, сварной шов, зона термического влияния, тепловое старение.

УДК 669.018.4:539.421

Расчетно-экспериментальное исследование кинетики трещины при ползучести в дугообразном образце из сплава 45X26H33C2B2 при температуре 900°C. Попова И. П., Орыщенко А. С., Марголин Б. З. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 138–149.

Проведены экспериментальные исследования развития трещин в материале реакционных труб печей пиролиза, работающих в диапазоне температур 900–1100°C и изготовленных из сплава 45X26H33C2B2. Оценка развития трещин проведена на основании C^* -интеграла согласно стандарту ASTM 1457–02. Для получения экспериментальных данных разработаны специальные дугообразные образцы с исходным надрезом, позволяющие определять скорость роста трещины в натуральных сечениях трубы. Построены расчетные кривые для прогнозирования скорости роста трещины при длительном статическом нагружении и температуре 900°C. Полученные результаты сопоставлены с прогнозными зависимостями для хромоникелевых аустенитных сталей.

Ключевые слова: реакционные трубы, ползучесть, скорость роста трещины, C^* -интеграл, C_s^* -параметр, референсное напряжение.

УДК 539.421.5:621.643

Разработка методики определения критического угла раскрытия трещины СТОА как характеристики сопротивления магистральному вязкому разрушению металла трубопроводов. Виноградов О. П., Гусев М. А., Ильин А. В. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 150–160.

В настоящее время уделяется большое внимание определению параметра СТОА, характеризующего энергоемкость разрушения и скорость распространения магистральной трещины по вязкому механизму. Предлагаются различные методики испытаний, при этом крайне ограничены данные для металла в больших толщинах, отсутствует информация о проведении таких испытаний при пониженных температурах. Представлены первые результаты определения СТОА, позволяющие как уточнить саму методику испытаний, так и сформулировать проблемы для последующих теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: металл трубопроводов, вязкое разрушение, магистральная трещина, критический угол раскрытия трещины СТОА, методика исследований.

УДК 621.791.011:539.4

Определение конструктивной и технологической концентрации напряжений в сварных узлах при оценках усталостной прочности оболочечных конструкций. Ильин А. В., Садкин К. Е. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 161–176.

На базе расчетов МКЭ показана взаимная несогласованность методов $S-N$ кривых и “Hot Spot Stress”, используемых современными стандартами. Выполнен анализ напряжений в сварных соединениях с «двумерной» и «трехмерной» геометрией и проанализирована возможность определения концентрации напряжений в виде $K_t = K_s \cdot K_w$, где коэффициент K_s учитывает конструктивную, а K_w – технологическую концентрацию напряжений. Для определения K_w предложено использование приближенных зависимостей, найденных для двумерных задач. Для «трехмерных» сварных узлов предложено дифференцировать ситуации, когда значения K_s могут быть заранее табулированы и когда построение моделей МКЭ фрагмента конструкции является единственным способом оценки напряженного состояния.

Ключевые слова: концентрация напряжений, усталостная прочность, сварные соединения, оболочечные конструкции.

УДК 621.039.531:539.422.22

Анализ эффекта флакса нейтронов применительно к радиационному охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Пирогова Н. Е. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 177–195.

Представлены исследования по влиянию флакса нейтронов на охрупчивание материалов корпусов реакторов ВВЭР посредством сопоставления данных испытаний образцов-свидетелей и данных испытаний образцов, облученных высоким флаксом нейтронов в рамках исследовательских программ. Проведен анализ эффекта флакса нейтронов при различных механизмах охрупчивания материалов корпусов реакторов.

Ключевые слова: радиационное охрупчивание, материалы корпусов реакторов ВВЭР, флюенс нейтронов, флакс нейтронов.

УДК 661.665.3:621.762:621.039.562

Модель выхода гелия из облученного порошка карбида бора под оболочку поглощающего элемента реактора ВВЭР. Светухин В. В., Кадочкин А. С., Рисованый В. Д. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 196–202.

Предложена модель, описывающая временную и температурную зависимость давления гелия, выходящего из облученного порошкового карбида бора под оболочку поглощающего элемента (пэла) реактора ВВЭР. Проведено моделирование поведения пэла в условиях проектной аварии с потерей теплоносителя (LOCA). При помощи численного моделирования с использованием экспериментальных данных определена проницаемость порошка карбида бора для пэлов аварийной защиты и автоматического регулирования, определены параметры, характеризующие выход гелия из зерен порошка карбида бора при различных температурах.

Найдено соотношение критических параметров – температуры и времени воздействия, определяющих безопасный режим эксплуатации пэлов.

Ключевые слова: карбид бора, просачиваемость, поглощающий элемент, уравнение Дарси, авария типа LOCA.

УДК 621.9.014.8:621.961.2

Проблемы и перспективы утилизации стружечных металлических отходов. Андронов Е. В., Виноградов С. Е., Орыщенко А. С., Пименов А. В., Тимофеев В. Н. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 203–208.

Проведен анализ различных способов утилизации стружечных металлических отходов. Основными проблемами их утилизации является низкая плотность получаемого продукта и загрязненность неметаллическими и органическими веществами. Перспективное направление получения брикет-электродов – прессование стружечных металлических отходов при одновременном воздействии на них давления и импульсов электрического тока. Для получения литых заготовок брикет-электроды переплавляются в установке электрошлакового переплава, что обеспечивает получение материала по составу, близкого к исходному.

Ключевые слова: стружечные металлические отходы, утилизация, прессование, электрический ток, брикет-электроды.

УДК 539.421:621.961.2

Параметры зарождения направленной трещины для разрезания металла. Корниенко В. М. – Вопросы материаловедения, 2012, № 2(70), с. 209–220.

Характеризуется состояние вопроса о процессе разделения (разрезания) металла по инновационной технологии на основе запуска режущей трещины по трассированному кумулятивным анодным растворением металла надрезу с использованием жидкого азота. Необходимое количество жидкого азота определяется из расчета времени его полива и численного значения температуры металла. Установлен принцип зарождения направленной по надрезу трещины в охрупченном слое металла и показаны средства технологического оснащения для его осуществления. Разработка имеет большое практическое значение для технологической подготовки производства по переработке больших масс металла.

Ключевые слова: жидкий азот, зона локального охлаждения, импульсная нагрузка, кумулятивное анодное растворение металла, направленная трещина, охрупченный слой металла, разделение (разрезание) металла, разрушающее напряжение, трещинообразующее сечение.