

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Маликова Александра Геннадьевича «УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИКОЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

Работа посвящена оптимизации лазерной сварки алюминиевых сплавов для получения сварных соединений без дефектов и с прочностными характеристиками, близкими к характеристикам свариваемых алюминиевых сплавов.

Проблема состоит в том, что при сварке алюминиевых сплавов их структура разрушается, что приводит к снижению прочностных характеристик, поэтому сварка не применяется в авиационной промышленности.

Автор исследовал современными методами фазовый состав материала шва и выяснил причину снижения прочностных характеристик материала сварного шва. Автор сделал вывод, что к снижению прочностных характеристик материала шва приводит разрушение микроструктуры, которая формируется при распаде зон Гинье-Престона и формировании интерметаллидов во время термической обработки.

Автор предложил провести дополнительную термическую обработку чтобы восстановить разрушенную микроструктуру материала шва.

Автором проведена колоссальная работа по изучению микроструктуры и фазового состава сварных соединений и механические характеристики сварных соединений. Проведены испытания сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов, полученных на оптимальном режиме сварки, на статическую прочность.

Показано, что при лазерной сварке сплава Д16Т на границе дендрита в сварном шве формируются медесодержащие стабильные фазы $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ и $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$. При лазерной сварке сплавов 1420, 1424 в сварном шве упрочняющая фаза $\delta'(\text{Al}_3\text{Li})$ отсутствует, присутствует только $S_1(\text{Al}_2\text{MgLi})$ на границе дендритного зерна и частично в твердом растворе. Для сплава 1441 на границе дендрита формируются фаза $T_2(\text{Al}_6\text{CuLi}_3)$, упрочняющие фазы $\delta'(\text{Al}_3\text{Li})$ и $S'(\text{Al}_2\text{CuMg})$ отсутствуют. Для сплава В-1461 на границе формируются в основном упрочняющие фазы $T_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$ и $T_2(\text{Al}_6\text{CuLi}_3)$. Для сплава В-1469 на границе формируются в основном упрочняющая фаза $T_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$.

Для всех исследуемых сплавов разработана методика обработки сварного соединения методом холодного прессования и термообработки.

Автором оптимизирован процесс закалки и искусственного старения для образцов со сварным соединением всех исследуемых сплавов. Найдены режимы термообработки (ТО), позволяющие получать механические характеристики и структурно-фазовый состав сварных соединений, близкие или равные основному материалу. Впервые показано, что, управляя параметрами термической обработки образцов со сварным соединением всех исследуемых алюминиево-литиевых сплавов, можно целенаправленно влиять на формирование заданных механических свойств сварного шва за счет изменения структурно-фазового состава сварного шва. Исследована эволюция структурно-фазового состава сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов с помощью современных независимых методов диагностики: впервые использование дифрактометрии синхротронного излучения в сочетании с высокоразрешающей просвечивающей, сканирующей электронной и оптической микроскопией.

Проведены малоцикловые испытания лазерных сварных соединений до и после ТО для алюминиево-литиевых сплавов 1420, 1441 и В-1461 на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, при повышенных и пониженных температурах.

Установлены зависимости приращения деформации при циклическом нагружении с амплитудами, превышающими предел упругости, от температуры. Для необработанных сварных соединений установлено, что при +85 °С повышается неоднородность приращения деформации, а его скорость увеличивается в 8 раз для сплава 1461, в 5 раз — для сплава 1420 и в 1,5 раза для сплава 1441. При температуре –60 °С у сплавов 1420 и 1461 появляются стадии упрочнения, в течение которых значение деформации при заданных граничных значениях напряжения уменьшается. При +20 °С происходит равномерное приращение деформации и увеличение амплитуды деформации при увеличении амплитуды напряжения. При +85 °С амплитуда деформации не меняется с увеличением амплитуды напряжения, ее значение составляет 0,55–0,5 от амплитуды деформации при +20 °С.

Актуальность

Одной из актуальнейших проблем современного развития авиакосмической техники является замена технологии заклепочного соединения современных алюминиевых сплавов при создании сложных деталей, обладающих уникальными эксплуатационными характеристиками, работающих в условиях высоких термических и механических нагрузок, на новые высокопроизводительные, материалосберегающие технологии, обеспечивающие заданные механические характеристики.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 23 печатные работы, входящие в перечень ВАК, и 27 работ в сборниках трудов всероссийских и международных, в том числе и зарубежных, конференций.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 1.1.9 механика жидкости газа и плазмы в части глав 1, 3, 4, 6, 7.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность представленных результатов определяется использованием комплекса современных аналитических методов исследования структуры материалов и оценки их свойств, воспроизводимостью экспериментальных данных, статистической обработкой результатов измерений, соответствием результатов исследований данным, полученным другими группами специалистов. Для формирования неразъёмных сварных соединений из термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов и исследования их структуры и свойств было использовано современное технологическое и аналитическое оборудование.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором либо в соавторстве с другими специалистами при его непосредственном участии. Диссертантом поставлена цель работы, сформулированы задачи, основные положения и выводы. В соавторстве проведены исследования структурно-фазового состава и механических свойств. Основные закономерности эволюции фазового состава и получения высокопрочных лазерных сварных соединений получены автором в соавторстве. Представление материалов диссертации согласовано с соавторами.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 190 наименований и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 390 страниц, включая 161 рисунок и 30 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко анализируется современное состояние вопроса. Обосновывается актуальность темы, формулируется цель работы. Перечислены основные положения диссертации, выносимые на защиту, определяется научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводится краткое описание диссертации по главам.

Первая глава посвящена обзору лазерной сварки алюминиевых сплавов. Рассмотрены основные типы лазеров, входящих в состав автоматизированных лазерных технологических комплексов по лазерной сварке.

Показано, что для лазерной сварки алюминиевых сплавов режим кинжального проплавления является эффективным процессом соединения металлических сплавов толщиной свыше 1 мм. Рассмотрен процесс образования парогазового канала в режиме кинжального проплавления.

Процесс лазерной сварки включает основные физические явления, а именно взаимодействие лазера с веществом, многократное отражение лазерного излучения внутри парогазового канала, фазовые переходы, поток жидкости и газа, теплообмен.

Вторая глава посвящена выбору современных термически упрочняемых алюминиевых сплавов и методам исследований.

В качестве термически упрочняемых алюминиевых сплавов были выбраны следующие марки. Сплав Д16Т системы Al-4,4Cu-1,5Mg ($C_{Cu}/C_{Mg} \approx 2,9$), который широко используется в аэрокосмической промышленности в качестве элементов фюзеляжа, силовых элементов каркаса, шпангоутов и т.д. Сплав 1420 системы Al-5,2Mg-2,1Li ($C_{Mg}/C_{Li} \approx 2-5$), который является промышленным сплавом авиационного назначения (сварные герметичные отсеки, окантовки иллюминаторов, люки и лючки, компоненты кабины и др.). Данный сплав был применен в конструкции самолетов Як-36, Як-38, МиГ-29М, Су-27, Як-42, Ту-204. Сплав 1424 системы Al-4,9Mg-1,65Li ($C_{Mg}/C_{Li} \approx 2,9$) является улучшенной модификацией сплава 1420 за счет дополнительного легирования цинком и скандием при некотором снижении содержания лития и магния. Сплав 1424 является перспективным сплавом взамен сплава 1933 в конструкции нового самолета Sukhoi SuperJet New и ИЛ-114-300. Среднепрочный высокоресурсный промышленный сплав 1441 системы Al-1,7Cu-0,9Mg-2Li ($C_{Cu}/C_{Mg} \approx 1,88$ и $C_{Cu}/C_{Li} \approx 0,85$) является перспективным для внедрения в авиапромышленность за счет высокой технологичности при холодной и горячей деформации взамен сплава 1163. Данный сплав используется в качестве обшивочных листов для самолетов Бе-200, Бе-103, а также в конструкции нового самолета Sukhoi SuperJet New и ИЛ-114-300. Высокопрочный сплав В-1461 разработан на базе системы Al-2,7Cu-0,3Mg-1,8Li ($C_{Cu}/C_{Mg} \approx 9$ и $C_{Cu}/C_{Li} \approx 1,5$). Сплав В-1461 нашел применение в ПАК Т-50 и ракете-носителе Ангара. Сплав В-1469 системы Al-3,9Cu-0,3Mg-1,2Li ($C_{Cu}/C_{Mg} \approx 13$ и $C_{Cu}/C_{Li} \approx 3,25$) первый в России алюминиево-литиевый сплав, который по удельной прочности превосходит существующие алюминиевые деформируемые сплавы и обладает при этом высокими характеристиками коррозионной стойкости, трещиностойкости и усталостной прочностью. Данный сплав является наиболее перспективным алюминиевым сплавом для применения в силовых конструкциях ракетно-космической техники взамен сплава В95очТ2.

Данные алюминиево-литиевые сплавы разработаны в ФГУП «ВИАМ» и защищены патентами РФ. Описан структурно-фазовый состав и механические свойства выбранных термически упрочняемых сплавов.

Для формирования лазерных сварных соединений и исследованию их структуры и свойств было использовано современное технологическое и диагностическое оборудование. Эксперименты по получению лазерных сварных соединений выполнялись на автоматизированном лазерном технологическом комплексе «Сибирь», разработанном в ИТПМ СО РАН, включающем мощный CO₂-лазер. Использована лазерная сварка встык.

Проводились комплексные исследования на растяжение, металлографические исследования с применением оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, структурно-фазовые исследования с использованием синхротронного излучения. Особо следует отметить, что впервые для исследования фазового состава алюминиевых лазерных сварных соединений использовали установку класса «мегасайенс», входящую в ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

Третья глава посвящена исследованию формирования сварного шва и его характеристик в результате лазерного воздействия.

Проведена оптимизация параметров процесса лазерной сварки по энергетическим параметрам: скорости сварки, мощности излучения, диаметра, глубины и места расположения фокусного пятна, а также расхода защитного нейтрального газа с целью получения лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов без внешних дефектов для всех исследуемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

Четвертая глава посвящена оптимизации фазового состава и достижению оптимальных механических свойств за счет посттермообработки в виде закалки и искусственного старения лазерных сварных соединений для всех исследуемых алюминиевых сплавов. Необходимо отметить, что стандартные режимы ТО, типа ТО1–ТО6 не годились, т.к. деталь была неоднородна, включала основной сплав и шов. ТО должно было решить сложную задачу, изменить по замкнутому циклу фазовый состав, сохранить прочность сплава и восстановить прочность шва.

Лазерные сварные соединения, полученные на оптимальных режимах, подвергались закалке и искусственному старению. Закалка производилась в интервале температур 320–560 °С и при выдержке в течение 30 мин с последующим охлаждением в воде. Искусственное старение осуществлялось в интервале температур 120–210 °С при времени выдержки 8–42 часа.

Пятая глава посвящена малоцикловым испытаниям термообработанных сварных соединений на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, при температурах –60, +20, +85 °С. Было проведено испытание образцов со сварным соединением сплава В-1461, 1441 и 1420 без ТО и после оптимального ТО. Проводились также испытания на многократное нагружение

при температуре 20 °С для самих сплавов. Исследовалась морфология изломов после разрушения образцов.

Для образцов со сварным соединением сплава В-1461 после ТО показаны типичные зависимости добавочной деформации $\Delta\varepsilon$ образца при напряжении σ_{\max} от числа циклов нагружения N для различных температур. При σ_{\min} аналогичные зависимости имеют такой же вид, амплитуда деформации в цикле остается постоянной.

При понижении температуры увеличивается неоднородность процессов накопления поврежденности материала, отображающихся в изменении деформации $\Delta\varepsilon$. При повышении температуры, напротив, однородность увеличивается и при $T_{\text{test}} = 85^\circ\text{C}$ кривая $\Delta\varepsilon(N)$ имеет вид, обычный для малоциклового растяжения однородного металла с большим запасом пластической деформации, то есть состоит из трех последовательных участков замедляющегося, стабильного и ускоряющегося приращения деформации. При этом значительно увеличивается суммарное приращение деформации при циклическом растяжении.

И в том и в другом случае предельное число циклов уменьшается по сравнению с растяжением при $T_{\text{test}} = 20^\circ\text{C}$ при равных значениях предварительной деформации, определяющей амплитуду циклического нагружения. При предварительной деформации 4% число циклов до разрушения снижается с 8500 ($T_{\text{test}} = 20^\circ\text{C}$) до 3000–5000 ($T_{\text{test}} = 85, -60^\circ\text{C}$). Таким образом, оценка усталостной долговечности сварного соединения при температуре, близкой к 20 °С, может оказаться завышенной в 1,5–2 раза, если соединение будет работать при низких или повышенных температурах.

Шестая глава посвящена изучению механики структурно-фазового состава лазерных сварных соединений.

Исследована эволюция структурно-фазового состава лазерных сварных соединений сплава Д16Т системы Al–4,4Cu–1,5Mg до и после оптимальной термообработки. В процессе сварки в шве фазовый состав и распределение легирующих элементов существенно изменяется. В сварочном шве кроме S(Al₂CuMg) формируется стабильная некогерентная фаза $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$. Рост прочности при закалке связан с первыми стадиями процесса распада пересыщенных твердых растворов: с образованием зон ГП и с выделением промежуточных метастабильных θ'' - и S''-фаз (в сплавах Al–Cu–Mg). Максимальные механические характеристики образца со сварным швом достигнуты при использовании полного комплекса термического воздействия: закалки и искусственного старения. Представленные результаты дают исчерпывающую картину изменения механических характеристик неразъемных соединений сплава Al–Cu–Mg, полученных методом лазерной сварки и подвергнутых термической постобработке (закалка и искусственное старение

Седьмая глава посвящена обобщению результатов исследований и влиянию легирующих элементов Mg, Cu, Li на механику структурно-фазового состава и механические характеристики сварного шва.

Для всех используемых в работе термически упрочняемых алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов процесс лазерной сварки приводит к разрушению исходной структуры материала с образованием крупной дендритной структуры и изменением фазового состава. При лазерной сварке сплава Д16Т на границе дендрита в сварном шве формируются медесодержащие фазы $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ и $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$. При лазерной сварке сплавов 1420, 1424 в сварном шве упрочняющая фаза $\delta'(\text{Al}_3\text{Li})$ отсутствует, присутствует только $S_1(\text{Al}_2\text{MgLi})$ на границе дендритного зерна и частично в твердом растворе. Для сплава 1441 на границе дендрита формируются фаза $T_2(\text{Al}_6\text{CuLi}_3)$, упрочняющие фазы $\delta'(\text{Al}_3\text{Li})$ и $S'(\text{Al}_2\text{CuMg})$ отсутствуют. Для сплава В-1461 на границе формируются в основном фазы $T_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$ и $T_2(\text{Al}_6\text{CuLi}_3)$. Для сплава В-1469 на границе формируются в основном фаза $T_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$ и $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$. В зависимости от соотношения концентраций основных легирующих элементов Mg, Cu, Li роль данных фаз, участвующих в механизме упрочнения, различна.

По реакции на процедуру закалки все образцы можно разделить на две группы. Для образцов системы Al–Mg–Li характерна очень слабая или практически полное отсутствие зависимости временного сопротивления σ_b и предела текучести $\sigma_{0,2}$ от температуры закалки в широком интервале температур 320–530 °С. Изменяется только относительное удлинение (сплав 1420). Сплавы системы Al–Cu–Li имеют сложную зависимость временного сопротивления, и особенно предела текучести от температуры закалки. При малых температурах наблюдается небольшое снижение прочности и более значительное уменьшение предела текучести, т.е. механические характеристики детали становятся ниже, чем параметры шва после сварки. При увеличении температуры закалки параметры σ_b и $\sigma_{0,2}$ возрастают, однако предел текучести остается на уровне или даже несколько ниже характеристик сварного шва без ТО.

Замечания по диссертационной работе

1. Автор в диссертации пишет, что для восстановления механических свойств сплава сварной шов подвергается закалке и отжигу, однако очевидно, что этому воздействию подвергается и остальная часть образца, т.е. сплав, который уже закален и отожжен. Причем сплав закален и отожжен оптимальным образом, т.е. его дальнейшая термическая обработка не требуется. Таким образом сплав будет подвергнут избыточной термической обработке. Возможно что такое избыточное воздействие на сплав приведет к ухудшению его механических характеристик. Автор это явление не анализирует, что является упущением.

2. Автор в разделе Введение на странице 11 поставил для себя одну из задач: « 5. Разработка методов постобработки сварного соединения на

основе термообработки (закалка + искусственное старение) и холодного прессования с разными степенями пластической деформации для повышение механических характеристик.». Однако автор не пояснил можно ли будет эти методы реализовать практически на производстве: автор исследует образцы миллиметровых размеров, а на производстве изделия многометровые. Непонятно как реализовать закалку и отжиг больших изделий. Не понятно можно ли реализовать локально закалку и отжиг в районе сварного шва, т.к. у алюминиевых сплавов большая теплопроводность.

3. На странице 67 автор пишет «При использовании съемки по способу Лауэ (на просвет) в рассеянии фотонов участвует весь объем вещества на пути пучка излучения». Это означает, что в получаемых дифракционных данных отсутствует информация о распределении фаз по глубине. Теоретически может оказаться что разные фазы будут расслаиваться и распределяться по глубине неравномерно. Крайний случай – они всплывут как шлак. Автор не исследовал распределение фаз по глубине сварного шва и это является недостатком диссертационной работы.

4. Замечание к рисунку: «Рисунок 2.4 – Схема регистрации рефлексов фаз с помощью синхротронного излучения». На рисунке пучок СИ из ускорителя сразу попадает на образец, но это не так – он сначала попадает на монохроматор, затем входит в коллимирующую систему и только потом на образец. Этот рисунок вводит читателя в заблуждение – создается впечатление, что эксперимент проводился на полихроматическом излучении.

5. На странице 67 автор пишет: «Синхротронное излучение возникает при движении релятивистских заряженных частиц (в основном электронов) по криволинейным траекториям ...». Фраза «в основном электронов» некорректна. Создается впечатление, что вместе с электронами движутся еще другие частицы.

Опечатки:

1. На странице 66 автор не поставил открывающие кавычки в фразе: Дифрактометрия в «жестком» рентгеновском диапазоне"

2. На странице 67 автор пишет: «Вигглера» вместо «вигглера».

3. На странице 67 автор пишет: «в сплав0е» вместо «в сплаве»

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Считаю, что диссертационная работа «УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИКОЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ», отвечает критериям п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г, а ее автор Маликов Александр Геннадьевич заслуживает присуждения ученой

степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

д.х.н., главный научный сотрудник лаборатории Методов синхротронного излучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук»

630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, д. 18

e-mail: bptolochko@solid.nsc.ru

Тел.: +7 383-3294105

+7-913-949-

<http://www.solid.nsc.ru>

ко Борис Петрович
01 декабря 2021

Подпись Толочко Б
Директор ИХТТМ
Член. Корр. РАН д.

Немудрый А.П.
01 декабря 2021

СВЕДЕНИЯ

об официальном оппоненте

по диссертации Маликова Александра Геннадьевича «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – механика жидкости, газа и плазмы.

Фамилия, имя, отчество	Толочко Борис Петрович
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень	Доктор химических наук, 02.00.21
Ученое звание	с.н.с.
Место работы:	
Почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон (при наличии); адрес электронной почты (при наличии), адрес официального сайта в сети "Интернет" (при наличии)	630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, д. 18 e-mail: bptolochko@solid.nsc.ru Тел.: +7 383-3294105 +7-913-949-1952 http://www.solid.nsc.ru
Полное наименование организации, сокращенное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук»
Должность	Главный научный сотрудник лаборатории Методов синхротронного излучения

Список По теме рассматриваемой диссертации имею 102 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. V.Yu Filimonov, M.V. Loginova, S.G. Ivanov, A.A. Sitnikov, V.I.Yakovlev, A.V. Sobachkin, A.Z. Negodyaev, A.Y.U. Myasnikov, **B.P. Tolochko**, M.R. Sharafutdinov, Dynamics of structure formation processes in mechanically activated powder mixture Ti+Al under conditions of continuous heating. High temperature stage. Materials Chemistry and Physics. 2020. Volume 243, 122611. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122611>
2. V.G. Shevchenko, V.N. Krasil'nikov, D.A. Eselevich, A.V. Konyukova, Z.S. Vinokurov, A.I. Ancharov & **B.P. Tolochko** Influence of the Amount of Fe₂O₃ Modifier on the Oxidation Rate of ASD-4 Micron-Sized Powder. Combust Explos Shock Waves. 2020. 56, 156–162. <https://doi.org/10.1134/S0010508220020069>

3. Шарафутдинов М.Р., **Толочко Б.П.**, Купер К.Э., Анчаров А.И. Стратегия in vivo-исследования поведения лекарственных форм рентгенодифракционными методами на пучках синхротронного излучения. Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 7, С. 149 - 151. <https://doi.org/10.3103/S1062873818070353>
4. Arakcheev A.S., Aulchenko V.M., Balash I.I., Burdakov A.V., Chernyakin A.D., Dokutovich V.A., Evdokov O.V., Kasatov A.A., Kazantsev S.R., Kosov A.V., Popov V.A., Sharafutdinov M.R., Shekhtman L.I., Shoshin A.A., **Tolochko B.P.**, Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N., Vaigel L.A., Zhulanov V.V. Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load. Journal of Synchrotron Radiation. 2019. Vol.26. P.1644-1649. <https://doi.org/10.1107/S1600577519007306>
5. В.М. Аульченко, В.В. Жуланов, Г.Н. Кулипанов, К.А. Тен, **Б.П. Толочко**, Л. И. Шехтман Исследование быстропротекающих процессов рентгенодифракционными методами в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения, УФН, 188:6 (2018), 577–594. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.01.038339>
6. **В.П. Tolochko**, K.V. Zolotarev Research on fast solid-state chemical reactions at the Siberian synchrotron and terahertz radiation center. Journal of Structural Chemistry. 2016. Vol. 57, No. 7, pp. 1288-1313. <https://doi.org/10.1134/S0022476616070027>
7. **В.П. Tolochko**, A.V. Kosov, O.V. Evdokov, I.L. Zhogin, K.A. Ten, E.R. Prueel, L.I. Shekhtman, V.M. Aulchenko, V.V. Zhulanov, P.F. Piminov, V.P. Nazmov, K.V. Zolotarev, G.N. Kulipanov The Synchrotron Radiation Beamline 8-b at VEPP-4 Collider for SAXS, WAXS and Micro Tomography Investigation of Fast Processes at Extreme Condition of High Temperature and Pressure with Nanosecond Time Resolution. Physics Procedia Volume 84, 2016, Pages 427-433. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.072>
8. D.E. Butorin, V.G. Burov, S.V. Burov, **В.П. Tolochko** & I.A. Bataev Analysis of Structural Transformations Occuring in Surface Layers of D16 Alloy Samples During Sliding Friction. Russ Phys J. 2017. 60. 817–820. <https://doi.org/10.1007/s11182-017-1144-1>
9. K.A. Ten, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, I.A. Rubtsov, A.V. Kosov, L.I. Shekhtman, V.V. Zhulanov, **В.П. Tolochko**, G.N. Rykovanov, A.K. Muzyrya, E.B. Smirnov, M.Yu. Stolbikov, K.M. Prosvirnin Synchrotron Radiation Methods for Registration of Particles Ejected from Free Surface of Shock-loaded Metals. Physics Procedia Volume 84, 2016, Pages 366-373. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.063>
10. Shevchenko V.G., Eselevich D.A., Popov N.A., Krasil'nikov V.N., Vinokurov Z.S., Ancharov A.I., **Tolochko B.P.** Oxidation of ASD-4 powder modified by V₂O₅. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2018. Т. 54. № 1. С. 58-63. <https://doi.org/10.1134/S0010508218010094>

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело
соискателя и их дальнейшую обработ

20.10.2021

Дата

подпись

Б.П. Толочко