

## УДК 539.4

**Н.Н. Сергеев**, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

**С.Н. Кутепов**, канд. пед. наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: kutevov.sergei@mail.ru)

**А.Е. Гвоздев**, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: qwozdev.alexandr2013@yandex.ru)

**Е.В. Агеев**, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ageev\_ev@mail.ru)

## МЕХАНИЗМЫ ВОДОРОДНОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ, СВЯЗАННЫЕ С УСИЛЕНИЕМ ДИСЛОКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ

*В работе рассмотрены модели водородного растрескивания металлов и сплавов, основанные на взаимодействии водорода с дислокациями. Показано, что определяющая роль эмиссии дислокаций в AIDE-механизме, в свою очередь, подобна HELP, за исключением того, что деформации могут быть еще более локализованными, чем для коалесценции микропустот, связанной с HELP, так как напряжения, необходимые для распространения дислокаций, достаточно высоки для повышения общей дислокационной активности в пластической зоне перед трещинами. Это приводит к образованию небольших пустот на пересекающихся полосах скольжения. Отмечено что, рост трещины происходит в основном за счет эмиссии дислокаций. Тем не менее, эмиссия дислокаций к вершинам трещин и образование пустот впереди трещин также вносят свой вклад. При этом образование пустот впереди трещины помогает поддерживать малый радиус вершины трещины и малые углы раскрывающейся вершины трещины.*

*Рассмотрен вопрос о том, как происходит рост трещины в инертных средах для пластичных материалов. Пластичный рост трещины происходит преимущественно из-за дислокаций, зарождающихся от источников в пластической зоне впереди вершины трещины и движущихся обратно на поверхности вершины трещины, с небольшим или нулевым выбросом дислокаций, происходящих из вершины трещины. Небольшое количество дислокаций, выходящих из источников ближайших к вершине трещины, будет точно пересекать вершину трещины, чтобы произвести продвижение трещины – большинство будет только производить притупление или способствовать деформации впереди трещин. Поэтому необходимы большие деформации впереди трещины, чтобы произвести рост трещин с помощью коалесценции микропустот и глубоких впадин, с более мелкими углублениями в них, которые производятся на поверхностях разрушения.*

*Показано, что механизм растрескивания, производимый в результате AIDE-механизма, будет межзеренным или транскристаллитным в зависимости от того, где наиболее легко будет происходить распространение дислокаций и образование пустот. Для транскристаллитного растрескивания, альтернативное скольжение на плоскостях по обе стороны от трещины будет иметь тенденцию сведения к минимуму обратного напряжения от ранее испущенных дислокаций. Макроскопическая плоскость для транскристаллитного растрескивания при этом будет разделять угол между плоскостями скольжения, и фронт трещины будет лежать вдоль линии пересечения плоскостей трещин и плоскостей скольжения. Тем не менее, отклонения от плоскостей и направлений с низким показателем преломления будут иметь место, если неодинаковое количество скольжений произошло по обе стороны от трещины вследствие больших различий в сдвиговых напряжениях на разных плоскостях скольжения. Отклонения плоскостей разрушения в отсутствие низкого индекса плоскостей также могут возникнуть в зависимости от расположения зародышевых пустот впереди трещин.*

*Подробное описание связи между воздействием водорода на поведение дислокаций и вакансий, локализацию скольжения и водородную хрупкость недостаточно развито и остается серьезной проблемой, решение которой может быть осуществлено с помощью описания кинетики процесса водородного охрупчивания. Благодаря своей сложной природе, HELP и AIDE-механизмы могут быть способны внести свой вклад в охрупчивание, как при растрескивании, так и при образовании ямок, связанных с пластичным разрушением.*

**Ключевые слова:** эмиссия дислокаций, вершина трещины, HELP-механизм, AIDE-механизм, HEDE-механизм.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2017-21-2-32-47

**Ссылка для цитирования:** Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 32-47.

\*\*\*

Охрупчивающее воздействие водорода было открыто во второй половине XIX века французским ученым Сен-Клер

Девилем и его помощником инженером Кайтэ при обследовании стальных, используемых для изготовления артиллерийских

орудий. Однако лишь в XX веке изучению этого явления было уделено пристальное внимание отечественных и зарубежных ученых. Несмотря на систематические исследования проблема взаимодействия систем металл-водород остается открытой в связи с разнообразием подходов и методик к оценке охрупчивающего воздействия водорода и водородсодержащих сред. Не в полной мере разработана проблема низкотемпературного водородного растрескивания сталей, применяемых при многопроходной сварке, что сказывается на отсутствии единых рекомендаций по оптимизации данного процесса. Так же на первый план выходят проблемы хранения и транспортировки водорода в связи с его применением в качестве альтернативного вида топлива.

Рост числа теоретических и экспериментальных исследований, посвященных установлению общих закономерностей и механизмов водородного охрупчивания способствует развитию различных гипотез и теорий, описывающих данный процесс. Так в настоящее время одной из перспективных теорий водородного охрупчивания (ВО) является «ловушковая теория», предложенная Макнаббом и Фостером [1] в начале 60-х годов XX века и основанная на взаимодействии водорода с дефектами и неоднородностями кристаллической решетки металлических материалов, такими, как дислокации, вакансии, примеси, границы зерен, частицы второй фазы и пустоты [2-4]. Особое внимание при этом уделяется взаимодействию водорода с дислокационными скоплениями. Транспортировка водорода дислокациями происходит, когда материал подвергается большому внешнему напряжению и, следовательно, подвергается

пластической деформации, сопровождающейся усиленным образованием дислокаций и их движением [5-8, 56].

В 1972 году Бешам [9], на основе фрактографических наблюдений, показал, что водород облегчает движение и образование дислокаций в сталях. Эта теория была поддержана позже в начале 1980-х годов Бирнбаумом, Софронисом и Робертсоном [10, 11]. Этот эффект получил название механизма водородного усиления локализованной пластичности (hydrogen-enhanced localized plasticity – HELP-механизм).

Действие HELP-механизма (рис. 1) применимо как для водорода, находящегося в твердом растворе, так и для газообразного водорода. В общем случае механизм водородного усиления локализованной пластичности состоит в следующем: из-за гидростатического напряжения в материале диффундирующий водород может достигать высокой концентрации в зонах локализации (концентрации) напряжений, таких как вершина трещины.

Увеличение подвижности дислокаций является результатом экранирующего эффекта, вызванного свободным водородом в металлической матрице, который формирует атмосферу вокруг дислокаций и приводит к уменьшению энергии взаимодействия с препятствиями. Энергия активации для водорода обычно составляет порядка от 10 до 50 кДж/моль [13], что позволяет формировать атмосферы и двигаться с дислокациями в интервалах температур, где наблюдается охрупчивание. При этом, в отличие от других атмосфер растворенного вещества, когда дислокации движутся, водородные атмосферы могут перемещаться вместе с ними.

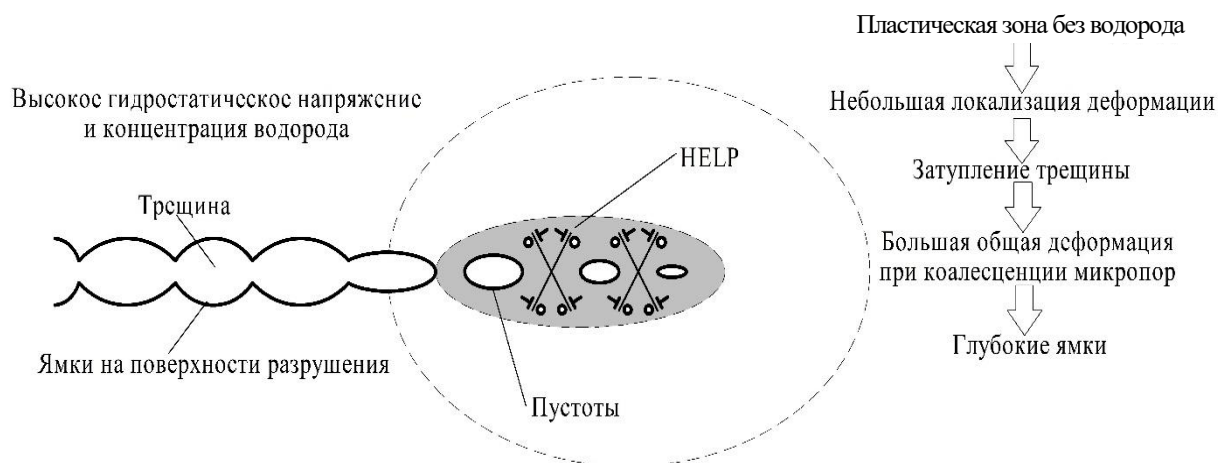


Рис. 1. Схематическое изображение HELP- механизма, связывающего процесс коалесценции микропор с усилением локализованной пластичности в районах высокой концентрации водорода [12]

Таким образом, существует взаимодействие между дислокациями и дефектами, которые включают в себя соответствующие атмосферы. Кроме того, так как водород остается мобильным в процессе взаимодействия, конфигурации атмосфер реагируют на поля упругих напряжений всех дефектов, участвующих во взаимодействии. Так, например, при приближении двух дислокаций друг к другу их водородная атмосфера переконфигурирует себя, и концентрация водорода в каждой точке отвечает на сумму полей напряжений обеих дислокаций; происходит переконфигурация, которая приводит к понижению энергии всей системы. В результате, дислокации могут перемещаться при более низком уровне напряжений Пайерлса-Набарро, что вызывает локализованное разупрочнение материала в областях с высокой концентрацией водорода, например в непосредственной близости от вершины трещины. Увеличение скорости движения дислокаций из-за водорода наблюдается для винтовых, краевых и смешанных дислокаций в полосах скольжения, и вдали от других дислокаций.

В этом случае, процесс разрушения представляет собой весьма локализованный процесс пластического разрыва, а не хрупкости. Это противоречит здравому смыслу, так как другие аргументы говорят, что макроскопическая пластичность ограничена началом обширной локализованной пластичности и поддерживается микроскопическими наблюдениями. Так, например, фрактографическое исследование водородного охрупчивания металлов, таких как Ni и Fe, выполненное авторами работ [14, 15], с помощью просвечивающей электронной микроскопии показывает обширные локализации пластической деформации вдоль поверхностей разрушения.

Данное противоречие может быть снято, если учесть, что распределение водорода может быть весьма неоднородным при приложении нагрузки. С макроскопической точки зрения данный тип разрушения является «хрупким». Изменение пластической деформации вплоть до полного разрушения образца будет минимальным, несмотря на высокую степень локальной пластичности. Процесс наблюдается в чистых металлах, высоко-

прочных сплавах и твердых растворах, в дисперсионно-твердеющих сплавах,  $\gamma'$ -упрочненных сплавах, в ОЦК, ГЦК и ГПУ кристаллических структурах. Несмотря на то, что исследователи данного вида хрупкости сходятся в том, что присутствие водорода повышает пластичность в вершине трещины и приводит к разрушению, подходы к описанию данного эффекта значительно отличаются. Так Линч [16] рассматривает данное явление в качестве поверхностного эффекта, в то время как Бирнбаум с соавторами [15] учитывают влияние водорода диффундировавшего в объем материала.

В случае ряда металлов эффекты от присутствия водорода усиливаются за счет сегрегации примесей на границах зерен. Так, например, синергетические эффекты сегрегации примесей, таких как S и P на границах зерен снижают активность (фугитивность) водорода, а также уменьшают количество водорода, необ-

ходимого для зарождения межкристаллитного разрушения.

В середине 80-ых годов XX века Линч [16, 17] предложил механизм водородного охрупчивания, связанный с эмиссией дислокаций при адсорбции водорода (adsorption-induced dislocation emission – AIDE-механизм). AIDE-механизм (рис. 2) представляет собой попытку создать единый механизм водородного охрупчивания, сочетающий в себе основные принципы HELP и HEDE (водородное усиление атомной декогезии)-механизмов. Для AIDE-механизма, термин «эмиссия дислокаций» включает в себя как зарождение, так и последующее движение дислокаций от вершины трещины, и это важно отметить, в связи с тем, что стадия зарождения, имеет решающее значение и способствует адсорбции. После зарождения, дислокации легко могут отойти от вершины трещины под действием приложенного напряжения.

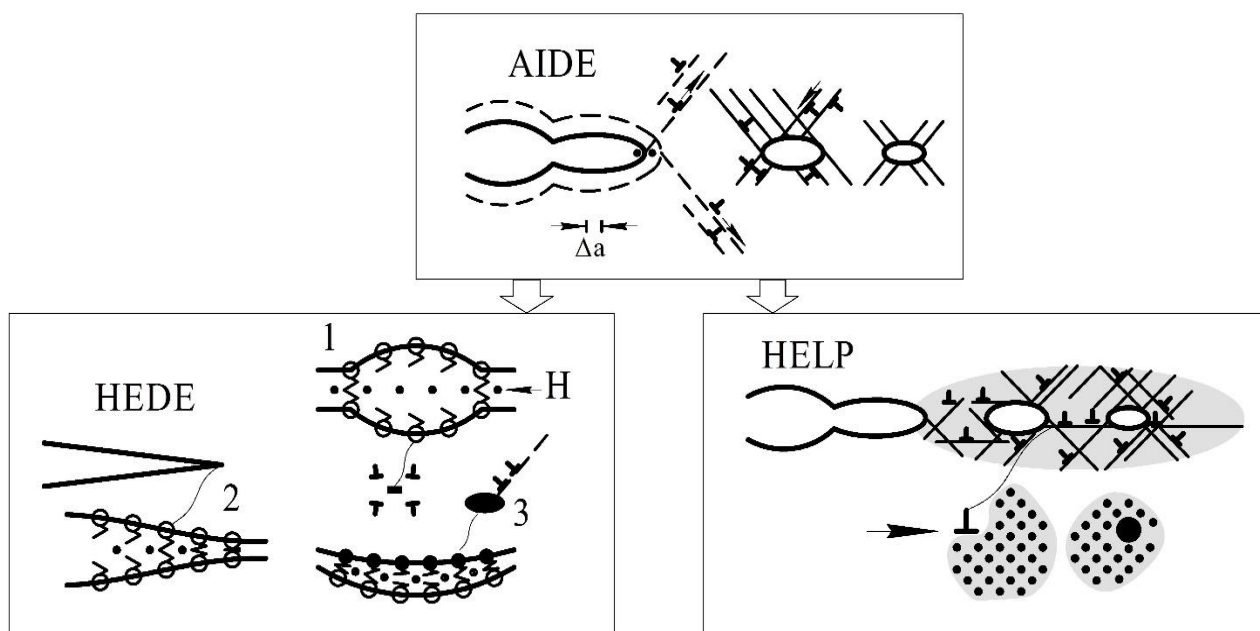


Рис. 2. Механизм водородного охрупчивания связанный с эмиссией дислокаций при адсорбции водорода: 1 – растворенный водород; 2 – абсорбированный водород; 3 – водород в частицах матричных интерфейсов; H – атомарный водород [12]

В соответствии с HEDE, механизм включает в себя ослабление межатомных связей в вершине трещины в результате абсорбции водорода. Поверхностные (подповерхностные) трещины выступают в качестве мест скопления водородных ловушек. Присутствие водорода в этих поверхностях приводит к ослаблению межатомных связей (предположительно металлических связей, в то время как связи водород-металл являются по своей природе слабыми) в вершине трещины, и способствует формированию и распространению дислокаций. Эмиссия дислокаций, в свою очередь, способствует и облегчает объединение трещин с микропустотами. Это объединение происходит преимущественно вдоль некоторых плоскостей с низкими индексами или по границам зерен, оставляя неглубокие ямки на поверхности разрушения, в процессе дальнейшего растрескивания [5, 56].

Определяющая роль эмиссии дислокаций в AIDE-механизме, в свою очередь, подобна HELP, за исключением того, что деформации могут быть еще более локализованными, чем для коалесценции микропустот, связанной с HELP, так как напряжения, необходимые для распространения дислокаций, достаточно высоки для повышения общей дислокационной активности в пластической зоне перед трещинами. Это приводит к образованию небольших пустот на пересекающихся полосах скольжения. Таким образом, рост трещины происходит в основном за счет эмиссии дислокаций. Тем не менее, эмиссия дислокаций к вершинам трещин и образование пустот впереди трещин также вносят свой вклад. При этом образование пустот впереди трещины помогает поддерживать малый радиус

вершины трещины и малые углы раскрывающейся вершины трещины.

Для того, чтобы понять, почему облегчение движения дислокаций от вершины трещины приводит к «охрупчиванию», необходимо рассмотреть вопрос о том, как происходит рост трещины в инертных средах для пластичных материалов. Пластичный рост трещины, как представляется, происходит преимущественно из-за дислокаций, зарождающихся от источников в пластической зоне впереди вершины трещины и движущихся обратно на поверхности вершины трещины, с небольшим или нулевым выбросом дислокаций, происходящих из вершины трещины. Лишь небольшое количество дислокаций, выходящих из источников, ближайших к вершине трещины, будет точно пересекать вершину трещины, чтобы произвести продвижение трещины – большинство будет только производить притупление или способствовать деформации впереди трещин. Поэтому необходимы большие деформации впереди трещины, чтобы произвести рост трещин с помощью коалесценции микропустот и глубоких впадин, с более мелкими углублениями в них, которые производятся на поверхностях разрушения. Небольшие впадины в пределах больших впадин возникают из-за слияния больших пустот (зарождающихся от крупных частиц) и включают в себя зарождение и рост мелких пустот (зарождающихся из более мелких частиц или других объектов при больших деформациях) между большими пустотами [18].

Адсорбция водорода способствует движению дислокаций от вершины трещины и росту дислокационной активности, результатом которой является подрастание трещины после эмиссии дисло-

каций на соответствующим образом расположенных плоскостях скольжения, вызывающее распространение и раскрытие трещины. В этом случае, слияние трещин с пустотами происходит при более низких напряжениях и неглубокие ямки возникают на поверхностях разрушения при реализации AIDE-механизма.

В качестве доказательств, подтверждающих AIDE-механизм и теорию эмиссии дислокаций, этот механизм был признан [5] также в условиях, когда не было времени для какой-либо значительной диффузии водорода впереди трещины. Таким образом, для AIDE-механизма не является обязательным условием совместное движение водородных атмосфер и дислокаций, как это было в случае с HELP-механизмом [5, 56].

Механизм растрескивания, производимый в результате AIDE-механизма, будет межзеренным или транскристаллитным в зависимости от того, где наиболее легко будет происходить распространение дислокаций и образование пустот. Для транскристаллитного растрескивания, альтернативное скольжение на плоскостях по обе стороны от трещины будет иметь тенденцию сведения к минимуму обратного напряжения от ранее испущенных дислокаций. Макроскопическая плоскость для транскристаллитного растрескивания при этом будет разделять угол между плоскостями скольжения, и фронт трещины будет лежать вдоль линии пересечения плоскостей трещин и плоскостей скольжения. Тем не менее, отклонения от плоскостей и направлений с низким показателем преломления будут иметь место, если неодинаковое количество скольжений произошло по обе стороны от трещины вследствие больших различий в сдвиговых напряжениях на

разных плоскостях скольжения. Отклонения плоскостей разрушения в отсутствие низкого индекса плоскостей также может возникнуть в зависимости от расположения зародышевых пустот впереди трещин [19, 57].

Барноус и Вехов, используя технику наноиндентирования, смогли доказать, что присутствие водорода в металлическом кристалле уменьшает необходимое напряжение для зарождения дислокаций, которое было названо «напряжением растрескивания». Это допускается путем уменьшения модуля сдвига, энергии линии дислокации и энергии дефектов упаковки [20, 21]. Эти наблюдения являются сильной поддержкой для возникновения и взаимодействия HEDE и HELP-механизмов.

Характерные особенности AIDE-механизма, которые могут быть получены с помощью электронной микроскопии, рассматриваются в [5], как: 1) ямочки поверхностей разрушения из-за высоких локализованных деформаций; 2) обширные скольжения на плоскостях, пересекающих трещины; 3) образование локализованных объединенных микрополостей в сочетании с усилением дислокационной активности. По сравнению с HEDE или HELP-механизмом, важность трещиноподобных поверхностных эффектов при водородном растрескивании считается [5, 56] более выраженной в AIDE-механизме и, следовательно, ей необходимо уделять больше внимания. Полученные результаты, подтверждающие роль поверхностных эффектов в AIDE-механизме, приведены в [5, 56], как: 1) высокая концентрация водорода на и под поверхностью вершины трещины; 2) существенное влияние адсорбции водорода на атомные связи; 3) развитие трещин

при очень высоких скоростях; 4) резкий переход из пластичного в хрупкое состояние, зависящий, например, от изменения температуры.

При совместном протекании AIDE и HELP-механизмов возможны дополнительные локализации деформации из-за взаимодействия водорода с вакансиями. Вакансионные эффекты, вероятно, играют лишь второстепенную роль, хотя было несколько радикальных предположений, что может быть водородное охрупчивание в первую очередь является результатом высокой концентрации вакансий впереди трещин, за счет вызванного водородом уменьшения энергии вакансионного образования, а не отдельными эффектами водорода [22]. Высокая концентрация вакансий впереди трещин может происходить не только из-за высоких концентраций водорода в областях с трехосным напряженным состоянием, но и потому, что водород стабилизирует вакансии, произведенные взаимодействием дислокация-дислокация [23]. Скопление вакансий может привести к образованию нано-пустот [24], и автокаталитический рост и слияние пустот может произойти, если количество или размер нано-пустот достигло критического уровня. Вакансии также могут облегчить восхождение дислокаций и поперечное скольжение, и уменьшить деформационное упрочнение, тем самым способствуя локализации деформации, возможно, в сочетании с водородом, вызывающим локализацию скольжения вследствие AIDE или HELP.

Все вышесказанное свидетельствует о том, что подробное описание связи между воздействием водорода на поведение дислокаций и вакансий, локализацию скольжения и водородную хрупкость недостаточно развито и остается серьезной

проблемой, решение которой может быть осуществлено с помощью описания кинетики процесса водородного охрупчивания. Благодаря своей сложной природе, HELP и AIDE-механизмы могут быть способны внести свой вклад в охрупчивание как при растрескивании, так и при образовании ямочек, связанных с пластичным разрушением. Однако количественные оценки зачастую проблематичны, так, например, процесс сложного моделирования эмиссии дислокаций. В этой связи для описания данного механизма представляется возможным использовать универсальные программные системы конечно-элементного анализа, позволяющие моделировать поведение материала в различных эксплуатационных условиях, а также методы молекулярной динамики, например «метод погруженного атома» [6, 25-28].

Полученные результаты могут быть использованы при разработке ресурсоберегающих технологий обработки материалов с использованием новых наноструктурных смазочных материалов и композиционных покрытий на предприятиях народного хозяйства и сервиса [29-55].

*Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/БЧ.*

### Список литературы

1. McNabb A., Foster P. K. A new analysis of the diffusion of hydrogen in iron and ferritic steels // Trans. Met. Soc. AIME. 1963. V. 227. № 3. P. 618-627.
2. Dayal R.K. Parvathavarthini N. Hydrogen embrittlement in power plant steels // Sadhana. 2003. V. 28. P. 431-451.
3. Развитие повреждаемости и обезуглероживание высокопрочных низколегированных сталей в условиях водородного охрупчивания / Н.Н. Сергеев, А.Н. Чука-

нов, В.П. Баранов, А.А. Яковенко // Металл. 2015. № 2. С. 4-9.

4. Накопление и транспорт водорода в ферритно-мартенситной стали РУ-СФЕР-ЭК-181 / Е.А. Денисов, Т.Н. Компаниец, М.А. Мурзинова, А.А. Юхимчук (мл.) // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 6. С. 38-44.

5. Lynch S.P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corrosion Reviews 30. 2012. P. 105-123.

6. Нагорных И.Л. Молекулярно-динамическое моделирование поведения системы железо-водород при деформировании: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17. Ижевск, 2011. 20 с.

7. Кутепов С.Н. Водородное усиление локализации пластичности в металлах и сплавах // Физико-химия и технология неорганических материалов: сб. мат. XIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов. (18–21.10.2016, Москва). М.: ИМЕТ РАН, 2016. С. 40-41.

8. Власов Н.М., Зазноба В.А. Влияние атомов водорода на подвижность краевых дислокаций // ФТТ. 1999. Т. 41. № 3. С. 451-453.

9. Beachem C.D. A new model for hydrogen assisted cracking (hydrogen embrittlement) // Metall. Trans. 1972. V.3. P. 437-451.

10. Birnbaum H.K., Sofronis P. Hydrogen-enhanced localized plasticity – a mechanism for hydrogen-related fracture // Mater. Sci. Eng., A. 1994. V. 176A. P.191-202.

11. Robertson I.M. The effect of hydrogen on dislocation dynamics // Engineering Fracture Mechanics. 1999. V. 64. P. 649-673.

12. Lynch S.P. Chapter 2: Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms // Stress Corrosion Cracking. Woodhead Publishing Limited. 2011. P. 90-130.

13. Hirth J. P. Effects of hydrogen on the properties of iron and steel // Metall. Trans. A. 1980. V. 11A. P. 861 – 890.

14. Eastman J., Matsumoto T., Narita N., Heubaum F., Birnbaum H.K. Hydrogen effects in nickel embrittlement or enhanced ductility? // in Proc. of Int. Conf. on Hydrogen in Metals, I. M. Bernstein and A. W. Thompson, eds. AIME: New York, 1980. P. 397-409.

15. Matsumoto T., Eastman J., Birnbaum H.K. Direct observations of enhanced dislocation mobility due to hydrogen // Scripta Metall. 1981. V. 15. P. 1033-1037.

16. Lynch S.P. A Fractographic Study of Gaseous Hydrogen Embrittlement and Liquid-Metal Embrittlement in a Tempered Martensitic Steel // Acta Metall. 1984. V. 32 № 1. P. 79-90.

17. Lynch S. P. A fractographic study of hydrogen-assisted cracking and liquid-metal embrittlement in nickel // J. Mater. Sci. 1986. V. 21. P. 692-704.

18. Lynch S. P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corrosion Reviews 30. 2012. P. 105-123.

19. Lynch S. P. Progress towards understanding mechanisms of hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking // CORROSION 2007. 2007. P. 1-55.

20. Barnoush A., Vehoff H. Electrochemical nanoindentation: A new approach to probe hydrogen/deformation interaction // Scripta Mater. 2006. V. 55. P. 195-198.

21. Barnoush A., Asgari M., Johnsen R. Resolving the hydrogen effect on dislocation nucleation and mobility by electrochemical nanoindentation // Scripta Mater. 2012. V. 66. P. 414-417.

22. Nagumo M. Hydrogen related failure of steels – a new aspect // Mater. Sci. Tech. 2004. V. 20. P. 940-950.



23. McLellen R.B., Xu Z.R. Hydrogen-induced vacancies in the iron lattice // Scripta Mater. 1997. V 36. P. 1201–1205.

24. Cuitino A.M., Ortiz M., Ductile fracture by vacancy condensation in F.C.C. single crystals // Acta Mater. 1996. V. 44. P. 427–436.

25. Кулабухова А.А. Исследование процессов абсорбции и диффузии водорода в ГЦК металлах методом молекулярной динамики: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Барнаул, 2014. 152 с.

26. Нагорных И.Л. Железо и водород. Исследования методами компьютерного эксперимента. Saarbrücken, Deutschland: LAMBERT Academic Publishing, 2012. 130 с.

27. Нагорных И.Л., Бесогонов В.В., Бурнышев И.Н. О выборе потенциалов межатомного взаимодействия для системы Fe-H в приближении метода погруженного атома // Вестник ИжГТУ. 2011. № 1. С. 114–117.

28. Нагорных И.Л., Бурнышев И.Н. Численное моделирование влияния водорода на поведение кристаллов Al, Fe, Ni и Pd при растяжении // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 14. № 4. С. 604–608.

29. Технология конструкционных и эксплуатационных материалов: учебник / А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки; под ред. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 351 с.

30. Организация и планирование деятельности предприятий сервиса: учебное пособие / Ю.С. Дорохин, А.Н. Сергеев, К.С. Дорохина, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, П.Н. Медведев, А.В. Сергеева, Д.В. Малий. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 380 с.

31. Триботехнические свойства композиционных покрытий с полиимидными матрицами и наполнителями из наноча-

стиц диалкогенидов вольфрама для узлов трения машин: монография / А.Д. Бреки, В.В. Кудрявцев, А.Л. Диденко, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 128 с.

32. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт автомобиля: учебное пособие / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, К.Г. Мирза, Ю.С. Дорохин, Д.М. Хонелидзе. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 160 с.

33. Основы технологической подготовки: учеб. пособие / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.Д. Бреки, Д.А. Провоторов, В.И. Золотухин, Н.Е. Стариков, П.Н. Медведев, Д.В. Малий, Ю.С. Дорохин, Д.Н. Боголюбова, А.А. Калинин, О.В. Кузовлева, К.Н. Старикова, С.Н. Кутепов, Д.М. Хонелидзе, В.В. Новикова; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е испр. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 187 с.

34. Материаловедение: учебник для вузов / Ф.К. Малыгин, Н.Е. Стариков, В.М. Павлов, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 232 с.

35. Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиимидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы диалкогенидов вольфрама: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 276 с.

36. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов / А.Е. Гвоздев, И.В. Гольшев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.М. Хонелидзе, А.Г. Кол-

маков // Материаловедение. 2015. № 2. С. 31-36.

37. Синтез и триботехнические свойства композиционного покрытия с матрицей из полиимида (Р-ООО) ФТ и наполнителем из наночастиц дисульфида вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В.Толочко, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков, Ю.А. Фадин // Материаловедение. 2016. № 4. С. 44-48.

38. Постановка задачи расчета деформационной повреждаемости металлов и сплавов / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. №10. С. 18-26.

39. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «Р-ОДФО» с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 11-1. С. 133-139.

40. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «ДАИ» с наполнителем из наночастиц дихалькогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 8-2. С. 148-155.

41. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «Р-ОООД» с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л.Диденко,

В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е.Гвоздев, Н.Е.Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 8-2. С. 181-188.

42. Выбор дисперсности наполнителя из частиц дихалькогенидов вольфрама для создания смазочного композиционного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.А. Калинин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 7-1. С. 235-243.

43. Оценка влияния размера частиц и концентрации порошков горных пород на противоизносные свойства жидких смазочных композиций / В.В. Медведева, М.А. Скотникова, А.Д.Бреки, Н.А. Крылов, Ю.А. Фадин, А.Н.Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 11-1. С. 57-65.

44. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами дисульфида вольфрама на трение в подшипниках качения / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Ю.А. Фадин, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 11-1. С. 78-86.

45. Оценка взаимодействия между наночастицами дихалькогенидов вольфрама в среде жидкого смазочного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 7-2. С. 8-14.

46. Оценка влияния жидкого смазочного композиционного материала с наночастицами геомодификатора на трение в подшипниковом узле / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета: Серия Техника и технологии. 2015. №3(16). С.17-23.

47. Комплексный подход к исследованию экстремальных эффектов в металлических, композиционных и нанокристаллических материалах: монография / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки, П.Н. Медведев, М.Н. Гаврилин, Г.М. Журавлев, Д.В. Малий, Ю.С. Дорохин, Д.Н. Боголюбова, А.А. Калинин, Д.Н. Романенко, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Проскуряков, А.С. Пустовгар, Ю.Е. Титова, И.В. Тихонова; под ред. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 128 с.

48. Триботехнические свойства жидких смазочных композиционных материалов, содержащих полученные методом газофазного синтеза высокодисперсные дисульфид и диселенид вольфрама: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков; под. ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 152с.

49. Жидкие смазочные композиционные материалы, содержащие высокодисперсные наполнители, для подшипниковых узлов управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 144с.

50. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева,

Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 39-43.

51. Гвоздев А.Е. Производство заготовок быстрорежущего инструмента в условиях сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.

52. Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, Ю.А. Фадин, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 75-82.

53. Триботехнические свойства пластичных смазочных композиционных материалов с наполнителями из дисперсных частиц меди и цинка / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Н. Сергеев, Д.В. Малий, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 109-119.

54. Триботехнические характеристики композиционных покрытий с матрицей из полигетероарилена ПМ-ДАДФЭ и наполнителями из наночастиц диалкилгенидов вольфрама при трении скольжения в среде жидкого смазочного материала / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3 (66). С. 17-28.

55. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе алю-

миния, упрочнённых углеродными нановолокнами, при трении по стали 12Х / А.Д. Бреки, Т.С. Кольцова, А.Н. Скворцова, О.В. Толочко, С.Е. Александров, А.А. Лисенков, Д.А.Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 4 (21). С. 11-23.

56. Lynch S. P. Mechanisms and Kinetics of Environmentally Assisted Cracking: Current Status, Issues, and Suggestions for Further Work // Metall. and Mat. Trans. A – 2013. V. 44A. P. 1209-1229.

57. Lynch S. P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corrosion Reviews. 30. 2012. P. 105-123.

Поступила в редакцию 02.03.17

UDC 539.4

**N. N. Sergeev**, Doctor of Engineering Science, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

**S. N. Kutepov**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: kutepov.sergei@mail.ru)

**A.E. Gvozdev**, Doctor of Engineering Science, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: qwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

**E.V. Ageev**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: ageev\_ev@mail.ru)

## DISLOCATION INDUCED MECHANISMS OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF METALS AND ALLOYES

*The paper discusses some models of hydrogen-stress cracking of metals and alloys. These models are based on hydrogen-dislocation interaction. It is shown that the critical role of dislocation emissions in AIDE mechanism is, in its turn, similar to HELP except for a higher localization of deformations compared with microvoids coalescence that is related with HELP, because that stresses needed for the dislocation propagation are high enough to boost general dislocation activity in deformation zones in front of cracks. This results in the formation of small voids on intersecting deformation bands. It has been observed that a crack is essentially growing due to the emission of dislocations. However the emission of dislocation towards the tip of a crack and the formation of voids in front of a crack contribute a lot to the process. Furthermore, the formation of voids in front of a crack makes for a short radius of the crack tip and low angles of the crack tip opening displacement*

*The paper considers crack growing in inert media in plastic materials. Crack plastic growth takes place mainly due to dislocations that originate from the sources in the deformation zone in front of the crack tip and are propagating backwards along the crack tip plane with a small or zero emission of the dislocations that start from the crack tip. Small number of the dislocations that originate in the sources lying closest to the crack tip will intersect the tip of the crack precisely thus promoting the crack development while the majority of the dislocation will have either blunting effect or contribute to the deformation in front of the crack. Thus to cause a crack growth due to microvoid coalescence and deep cavities with shallow depressions therein on fracture surfaces there must be a large deformation in front of the crack.*

*It is demonstrated that the cracking mechanism resulting from the AIDE mechanism will be either intergranular or transcrystalline depending on the location where the propagation of dislocations and formation of voids run mostly easily. In case of transcrystalline cracking alternative sliding motion along the planes on either side of the crack will tend to minimize the reverse stress caused by previously emitted dislocations. Then the macroscopic transcrystalline cracking plane will divide the angle between the slide planes and the crack front will be located on the intersection line of the crack planes and the slide planes. However, if there is a difference in the number of slides that occur on either crack side because of big differences in shear stresses on different slide planes, there will be deviations from the planes and directions with low refraction index. If the plane index is not low, there still can be deviations in the failure planes depending on the location of nucleus voids in front of the crack.*

*A detailed description of the relationship between hydrogen effect on the behavior of dislocations and voids, sliding motion localization and hydrogen embrittlement is still lacking, moreover, it presents a serious problem that*

can be solved by describing the kinetics of hydrogen embrittlement process. Thanks to their sophisticated nature HELP and AIDE mechanisms can be embrittlement contributors both in cracking and in the formation of cavities due to ductile fracture.

**Key words:** dislocation emission, crack tip, HELP mechanism, AIDE mechanism, HEDE mechanism.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2017-21-2-32-47

**For citation:** Sergeev N. N., Kutepov S. N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Dislocation Induced Mechanisms of Hydrogen Embrittlement of Metals And Alloys, Proceeding of Southwest State University, 2017, vol. 21, no. 2(71), pp. 32-47 (in Russ.).

\*\*\*

## Reference

1. McNabb A., Foster P. K. A new analysis of the diffusion of hydrogen in iron and ferritic steels // Trans. Met. Soc. AIME. 1963. V. 227. № 3. P. 618-627.
2. Dayal R.K. Parvathavarthini N. Hydrogen embrittlement in power plant steels // Sadhana. 2003. V. 28. P. 431-451.
3. Razvitie povrezhdaemosti i obezuglerozhivanie vysokoprochnyh nizkolegированных сталей в условиях водо-родного охрупчивания / N.N. Sergeev, A.N. Chukanov, V.P. Baranov, A.A. Jakovenko // MITOM. 2015. № 2. S. 4-9.
4. Nakoplenie i transport vodoroda v ferritno-martensitnoj stali RUSFER-JeK-181 / E.A. Denisov, T.N. Kompaniec, M.A. Murzinova, A.A. Juhimchuk (ml.) // ZhTF. 2013. T. 83. № 6. S. 38-44.
5. Lynch S.P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corrosion Reviews 30. 2012. P. 105-123.
6. Nagornyh I.L. Molekuljarno-dinamicheskoe modelirovanie povedenija sistemy zhelezo-vodorod pri deformirovanii: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.17. Izhevsk, 2011. 20 s.
7. Kutepov S.N. Vodorodnoe usilenie lokalizacii plastichnosti v metallah i splavah // Fiziko-himija i tehnologija neorganicheskikh materialov: sb. mat. XIII Rossijskoj ezhegodnoj konferencii molodyh nauchnyh sotrudnikov i aspirantov. (18–21.10.2016, Moskva). M.: IMET RAN, 2016. S. 40-41.
8. Vlasov N.M., Zaznoba V.A. Vlijanie atomov vodoroda na podvizhnost' kraevyh dislokacij // FTT. 1999. T. 41. № 3. S. 451-453.
9. Beachem C.D. A new model for hydrogen assisted cracking (hydrogen embrittlement) // Metall. Trans. 1972. V.3. P. 437–451.
10. Birnbaum H.K., Sofronis P. Hydrogen-enhanced localized plasticity – a mechanism for hydrogen-related fracture // Mater. Sci. Eng., A. 1994. V. 176A. P.191–202.
11. Robertson I.M. The effect of hydrogen on dislocation dynamics // Engineering Fracture Mechanics. 1999. V. 64. P. 649–673.
12. Lynch S.P. Chapter 2: Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms // Stress Corrosion Cracking. Woodhead Publishing Limited. 2011. P. 90-130.
13. Hirth J. P. Effects of hydrogen on the properties of iron and steel // Metall. Trans. A. 1980. V. 11A. P. 861 – 890.
14. Eastman J., Matsumoto T., Narita N., Heubaum F., Birnbaum H.K. Hydrogen effects in nickel embrittlement or enhanced ductility? // in Proc. of Int. Conf. on Hydrogen in Metals, I. M. Bernstein and A. W. Thompson, eds. AIME: New York, 1980. P. 397-409.
15. Matsumoto T., Eastman J., Birnbaum H.K. Direct observations of enhanced dislocation mobility due to hydrogen // Scripta Metall. 1981. V. 15. P. 1033–1037.
16. Lynch S.P. A Fractographic Study of Gaseous Hydrogen Embrittlement and Liquid-Metal Embrittlement in a Tempered Martensitic Steel // Acta Metall. 1984. V. 32 № 1. P. 79-90.
17. Lynch S. P. A fractographic study of hydrogen-assisted cracking and liquid-metal embrittlement in nickel // J. Mater. Sci. 1986. V. 21. P. 692-704.

18. Lynch S. P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // *Corrosion Reviews* 30. 2012. P. 105-123.
19. Lynch S. P. Progress towards understanding mechanisms of hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking // *CORROSION* 2007. 2007. P. 1-55.
20. Barnoush A., Vehoff H. Electrochemical nanoindentation: A new approach to probe hydrogen/deformation interaction // *Scripta Mater.* 2006. V. 55. P. 195–198.
21. Barnoush A., Asgari M., Johnsen R. Resolving the hydrogen effect on dislocation nucleation and mobility by electrochemical nanoindentation // *Scripta Mater.* 2012. V. 66. P. 414–417.
22. Nagumo M. Hydrogen related failure of steels – a new aspect // *Mater. Sci. Tech.* 2004. V. 20. P. 940–950.
23. McLellen R.B., Xu Z.R. Hydrogen-induced vacancies in the iron lattice // *Scripta Mater.* 1997. V 36. P. 1201–1205.
24. Cuitino A.M., Ortiz M., Ductile fracture by vacancy condensation in F.C.C. single crystals // *Acta Mater.* 1996. V. 44. P. 427–436.
25. Kulabuhova A.A. Issledovanie processov absorbcii i diffuzii vodoroda v GCK metallah metodom molekulyarno-dinamiki: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.07. Barnaul, 2014. 152 s.
26. Nagornyh I.L. Zhelezo i vodorod. Issledovaniya metodami komp'yuternogo jeksperimenta. Saarbrücken, Deutschland: LAMBERT Academic Publishing, 2012. 130 c.
27. Nagornyh I.L., Besogonov V.V., Burnyshev I.N. O vybere potencialov mezhatomnogo vzaimodejstvija dlja sistemy Fe-H v priblizhenii metoda pogruzhennogo atoma // *Vestnik IzhGTU.* 2011. № 1. S. 114-117.
28. Nagornyh I.L., Burnyshev I.N. Chislennoe modelirovanie vlijaniya vodoroda na povedenie kristallov Al, Fe, Ni i Pd pri rastjazhenii // *Himicheskaja fizika i mezoskopiya.* 2013. T. 14. № 4. S. 604-608.
29. Tehnologija konstrukcionnyh i jekspluatacionnyh materialov: uchebnik / A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, V.I. Zolotuhin, N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, A.D. Breki; pod red. A.E. Gvozdeva. Tula: Izd-vo TulGU, 2016. 351 s.
30. Organizacija i planirovanie dejatel'nosti predpriyatij servisa: uchebnoe posobie / Ju.S. Dorohin, A.N. Sergeev, K.S. Dorohina, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, P.N. Medvedev, A.V. Sergeeva, D.V. Malij. Tula: Izd-vo TulGU, 2016. 380 s.
31. Tribotekhnicheskie svojstva kompozicionnyh pokrytij s poliimidnymi matricami i napolniteljami iz nanochastich dihal'kogenidov vol'frama dlja uzlov trenija mashin: monografija / A.D. Breki, V.V. Kudrjavcev, A.L. Didenko, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, N.E. Starikov, A.E. Gvozdev; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 128s.
32. Jekspluatacija, tehničeskoe obsluživanie i remont avtomobilja: uchebnoe posobie / N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.N. Sergeev, K.G. Mirza, Ju.S. Dorohin, D.M. Honelidze. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 160 s.
33. Osnovy tehnologičeskoj podgotovki: ucheb. posobie / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, A.D. Breki, D.A. Provotorov, V.I. Zolotuhin, N.E. Starikov, P.N. Medvedev, D.V. Malij, Ju.S. Dorohin, D.N. Bogoljubova, A.A. Kalinin, O.V. Kuzovleva, K.N. Starikova, S.N. Kutepov, D.M. Honelidze, V.V. Novikova; pod red. prof. A.E. Gvozdeva. Izd. 2-e ispr. i dop. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 187 s.
34. Materialovedenie: uchebnik dlja vuzov / F.K. Malygin, N.E. Starikov, V.M. Pavlov, A.E. Gvozdev, I.V. Tihonova. Tula: Izd-vo TulGU, 2014. 232 s.
35. Tribotekhnicheskie harakteristiki zhidkih smazočnyh i poliimidnyh kompozicionnyh materialov, soderzhaščih anti-frikcionnye nanochasticy dihal'kogenidov vol'frama: monografija / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.E. Starikov, N.N. Sergeev, D.A. Provotorov, A.N. Sergeev, A.E. Gvozdev; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. 276 s.
36. Mnogoparametricheskaja optimizacija parametrov lazernoj rezki stal'nyh listov / A.E. Gvozdev, I.V. Golyshev, I.V. Minaev, A.N. Sergeev, N.N. Sergeev, I.V.

Tihonova, D.M. Honelidze, A.G. Kolmakov // *Materialovedenie*. 2015. № 2. S. 31-36.

37. Sintez i tribotekhnicheskie svoystva kompozitsionnogo pokrytija s matriciej iz poliimida (R-OOO) FT i napolnitelem iz nanochastic disulfida vol'frama pri suhom trenii skol'zhenija / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Ju.A. Fadin // *Materialovedenie*. 2016. № 4. S. 44-48.

38. Postanovka zadachi rascheta deformatsionnoj povrezhdaemosti metallov i splavov / A.E. Gvozdev, G.M. Zhuravlev, N.N. Sergeev, V.I. Zolotuhin, D.A. Provotorov // *Proizvodstvo prokata*. 2015. №10. S. 18-26.

39. Tribotekhnicheskie svoystva kompozitsionnyh pokrytij na osnove poligeteroarilena «R-ODFO» s napolnitelem iz nanochastic diselenida vol'frama / A.D. Breki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 11-1. S. 133-139.

40. Tribotekhnicheskie svoystva kompozitsionnyh pokrytij na osnove poligeteroarilena «DAI» s napolnitelem iz nanochastic dihal'kogenidov vol'frama / A.D. Breki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 8-2. S. 148-155.

41. Tribotekhnicheskie svoystva kompozitsionnyh pokrytij na osnove poligeteroarilena «R-OOOD» s napolnitelem iz nanochastic diselenida vol'frama / A.D. Breki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 8-2. S. 181-188.

42. Vybór dispersnosti napolnitelja iz chastic dihal'kogenidov vol'frama dlja sozdanija smazochnogo kompozitsionnogo materiala / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 7-1. S. 235-243.

43. Ocenka vlijanija razmera chastic i koncentracii poroshkov gornyh porod na protivoznosnye svoystva zhidkih smazochnyh kompozitsij / V.V. Medvedeva, M.A. Skotnikova, A.D. Breki, N.A. Krylov, Ju.A. Fadin, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 11-1. S. 57-65.

44. Vlijanie smazochnogo kompozitsionnogo materiala s nanochasticami disulfida vol'frama na trenie v podshipnikah kachenija / A.D. Breki, V.V. Medvedeva, Ju.A. Fadin, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 11-1. S. 78-86.

45. Ocenka vzaimodejstvija mezhdu nanochasticami dihal'kogenidov vol'frama v srede zhidkogo smazochnogo materiala / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 7-2. S. 8-14.

46. Ocenka vlijanija zhidkogo smazochnogo kompozitsionnogo materiala s nanochasticami geomodifikatora na trenie v podshipnikovom uzle / A.D. Breki, O.V. Tolochko, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeev, E.V. Ageev, A.E. Gvozdev // *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tekhnika i tehnologii*. 2015. №3(16). S.17-23.

47. Kompleksnyj podhod k issledovaniju jekstremal'nyh jeffektov v metallicheskikh, kompozitsionnyh i nanokristallicheskikh materialah: monografija / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, V.I. Zolotuhin, A.D. Breki, P.N. Medvedev, M.N. Gavrilin, G.M. Zhuravlev, D.V. Malij, Ju.S. Dorohin, D.N. Bogoljubova, A.A. Kalinin, D.N. Romanenko, I.V. Minaev, O.V. Kuzovleva, N.E. Proskurjakov, A.S. Pustovgar, Ju.E. Titova, I.V. Tihonova, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, A.A. Kalinin // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 7-1. S. 235-243.

honova; pod red. A.E. Gvozdeva. Tula: Izd-vo TulGU, 2014. 128 s.

48. Tribotekhnicheskie svojstva zhid-kih smazochnyh kompozicionnyh materialov, sodержashhih poluchennye metodom gazofaznogo sinteza vysokodispersnye disul'fid i diselenid vol'frama: monografija / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2014. 152s.

49. Zhidkie smazochnye kompozicionnye materialy, sodержashhie vysokodispersnye napolniteli, dlja podshipnikovyh uzlov upravljajemyh sistem: monografija / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov. Tula: Izd-vo TulGU, 2014. 144s.

50. Mehanicheskie svojstva konstrukcionnyh i instrumental'nyh stalej v sostojanii predprevrashhenija pri termomechanicheskom vozdejstvii / A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, O.V. Kuzovleva, N.N. Sergeev, I.V. Tihonova // Deformacija i razrushenie materialov. 2013. № 11. S. 39-43.

51. Gvozdev A.E. Proizvodstvo zagotovok bystrorezhushhego instrumenta v uslovijah sverhplastichnosti. M.: Mashinostroenie, 1992. 176 s.

52. Issledovanie protivoznosnyh svojstv plastichnogo smazochnogo kompozicionnogo materiala, sodержashhego dispersnye chasticy sloistogo modifikatora trenija / V.V. Medvedeva, A.D. Breki, N.A. Krylov, M.A. Skotnikova, Ju.A. Fadin, S.E. Aleksandrov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, A.N. Sergeev, E.V. Ageev // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. № 1 (64). S. 75-82.

53. Tribotekhnicheskie svojstva plastichnyh smazochnyh kompozicionnyh materialov s napolniteljami iz dispersnyh chastic medi i cinka / V.V. Medvedeva, A.D. Breki, N.A. Krylov, S.E. Aleksandrov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, N.N. Sergeev, E.V. Ageev, A.N. Sergeev, D.V. Malij, D.A. Provotorov // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. № 2 (65). S. 109-119.

54. Tribotekhnicheskie karakteristiki kompozicionnyh pokrytij s matricej iz poligeteroarilena PM-DADFJe i napolniteljami iz nanochastic dihal'kogenidov vol'frama pri trenii skol'zhenija v srede zhidkogo smazochnogo materiala / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, Ju.A. Fadin, N.E. Starikov, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, E.V. Ageev, D.A. Provotorov // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. № 3 (66). S. 17-28.

55. Antifrikcionnye svojstva kompozicionnyh materialov na osnove aljuminija, uprochnjonnyh uglerodnymi nanovoloknami, pri trenii po stali 12H / A.D. Breki, T.S. Kol'cova, A.N. Skvorcova, O.V. Tolochko, S.E. Aleksandrov, A.A. Lisenkov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeev, D.V. Malij, A.N. Sergeev, E.V. Ageev, A.E. Gvozdev // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii. 2016. № 4 (21). S. 11-23.

56. Lynch S. P. Mechanisms and Kinetics of Environmentally Assisted Cracking: Current Status, Issues, and Suggestions for Further Work // Metall. and Mat. Trans. A. 2013. V. 44A. P. 1209-1229.

57. Lynch S. P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corrosion Reviews. 30. 2012. P. 105-123.