

МАШИНОСТРОЕНИЕ
МАШИНА ЖАСАУ
MECHANICAL ENGINEERINGDOI 10.51885/1561-4212_2022_3_190
MRNTI29.19.13; 29.19.11**А.В. Русакова¹, Д.Л. Алонцева^{1,2}, А.Р. Хожанов²**¹Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан²Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: avrussakova@mail.ru

E-mail: dalontseva@mail.ru*

E-mail: alexsktl@mail.ru

**КРАТКИЙ ОБЗОР ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСЛОКАЦИОННЫХ СУБСТРУКТУР
И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ ГАДФИЛЬДА НА МЕХАНИЗМЫ ЕЕ УПРОЧНЕНИЯ
И ПЛАСТИЧНОСТИ****ГАДФИЛЬД БОЛАТЫНЫҢ ДИСЛОКАЦИЯЛЫҚ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ХИМИЯЛЫҚ
ҚҰРАМЫ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ОНЫҢ БЕРІКТІГІ МЕН ИЛЕМДІЛІК МЕХАНИЗМЕРІНЕ
ӘСЕРІНЕ ҚЫСҚАША ШОЛУ****BRIEF REVIEW OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND THE
PARAMETERS OF DISLOCATOR SUBSTRUCTURES OF HADFIELD STEEL ON THE
MECHANISMS OF ITS HARDENING AND PLASTICITY**

Аннотация. В настоящее время в центре внимания мировых научных исследований находятся механизмы упрочнения и пластичности стали Гадфильда, представляя значительный научный и практический интерес применительно к конкретным технологическим процессам. В частности, актуальной задачей является повышение эксплуатационной стойкости стальных литых деталей путем обеспечения более высоких свойств стали и особенно её ударной вязкости и разработка новых технологических приемов, повышающих эксплуатационные свойства стальных отливок для железнодорожного транспорта. В последнее время наблюдается ужесточение требований к механическим свойствам литых деталей железнодорожного транспорта, что, однако, пока не вполне обеспечивается действующими технологиями их изготовления.

Целью данного обзора научной литературы из открытых источников с глубиной охвата 10 лет являются критический анализ исследований, посвященных механизмам упрочнения и пластичности стали Гадфильда, и выявление описанных в научной литературе основных факторов, влияющих на формирование микроструктуры и механические свойства стали Гадфильда, чтобы представить последние достижения в этой области и вызовы, связанные с перспективами их промышленного внедрения. В частности, особое внимание уделяется анализу влияния параметров дислокационных субструктур и химического состава стали Гадфильда на механизмы ее упрочнения и пластичности для выявления закономерностей, которые позволят дать рекомендации по термической обработке стали или по допустимым и желательным отклонениям в ее химическом составе. Ожидается, что данный обзор будет стимулировать более тесное сотрудничество между исследователями в различных областях, включающих производство, обработку и исследование свойств стали Гадфильда, а также способствовать дальнейшим разработкам для внедрения в производство.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, химический состав, деформационное упрочнение,

дислокационная субструктура.

Аңдатпа. Қазіргі уақытта Гадфильд болатының беріктігі мен илемділік механизмдері нақты технологиялық процестерге қатысты маңызды ғылыми және практикалық қызығушылықты білдіретін әлемдік ғылыми зерттеулердің назарында. Атап айтқанда, болаттың жоғары қасиеттерін және әсіресе оның соққыға төзімділігін қамтамасыз ету және темір жол көлігі үшін болат құймаларының қызмет көрсету қасиеттерін арттыратын жаңа технологиялық әдістерді әзірлеу арқылы құйма болат бөлшектерінің қызмет ету мерзімін арттыру кезек күттірмейтін міндет болып табылады. Соңғы уақытта теміржол көлігінің құйылған бөлшектерінің механикалық қасиеттеріне қойылатын талаптардың қатаюы байқалды, алайда бұл оларды жасаудың қолданыстағы технологияларымен әлі толық қамтамасыз етілмеген.

10 жылдық ашық ғылыми әдебиеттерге шолу жасаудың мақсаты – Гадфильд болатының беріктігі мен илемділік механизмдері туралы зерттеулерге сыни шолу жасау, Гадфильд болатының микроқұрылымы мен механикалық қасиеттерінің қалыптасуына әсер ету, осы салада оларды өнеркәсіптік енгізу перспективаларына байланысты соңғы жетістіктері мен қиындықтарын көрсету.

Атап айтқанда, болатты термиялық өңдеу немесе оның химиялық құрамындағы қолайлы және қалаулы ауытқулар бойынша ұсыныстар беруге мүмкіндік беретін үлгілерді анықтау үшін, дислокациялық қосалқы құрылымдардың параметрлері мен Гадфильд болатының химиялық құрамының оның беріктігі мен илемділік механизмдеріне әсерін талдауға ерекше назар аударылады. Бұл шолу Гадфильд болатының өндірісін, өңдеуін және қасиеттерін, сондай-ақ индустрияландыру бойынша одан әрі әзірлемелерді қоса алғанда, әртүрлі салалардағы зерттеушілер арасындағы тығыз ынтымақтастықты ынталандырады деп күтілуде.

Түйін сөздер: Гадфильд болаты, химиялық құрамы, деформациялық беріктену, дислокациялық қосалқы құрылым.

Abstract. At present, the mechanisms of hardening and ductility of Hadfield steel are in the center of attention of world scientific research, representing significant scientific and practical interest in relation to specific technological processes. In particular, an urgent task is to increase the service life of cast steel parts by providing higher steel properties and especially its impact strength and the development of new technological methods that increase the service properties of steel castings for railway transport. Recently, there has been a tightening of requirements for the mechanical properties of cast parts of railway transport, which, however, is not yet fully ensured by the existing technologies for their manufacture.

The aim of this review of open-source scientific literature over a 10-year period is to critically review research on the mechanisms of hardening and ductility of Hadfield steel, to identify the main factors described in the scientific literature that affect the formation of the microstructure and mechanical properties of Hadfield steel, in order to present the latest achievements in this field and challenges associated with the prospects for their industrial implementation.

In particular, special attention is paid to the analysis of the influence of the parameters of dislocation substructures and the chemical composition of the Hadfield steel on the mechanisms of its hardening and ductility, in order to identify patterns that will make it possible to give recommendations on the heat treatment of steel or on acceptable and desirable deviations in its chemical composition. It is expected that this review will stimulate closer collaboration between researchers in various fields, including the production, processing and properties of Hadfield steel, as well as further developments for industrialization.

Keywords: Hadfield steel; chemical composition; strain hardening; dislocation substructure; twinning.

Введение. В настоящее время в центре внимания мировых научных исследований находятся механизмы упрочнения и пластичности стали Гадфильда, представляя значительный научный и практический интерес применительно к конкретным технологическим процессам. В частности, из марганцовистой стали Гадфильда 20ГЛ изготавливают отливки, которые способны работать со значительными требованиями к износу, к устойчивости к ударным и переменным нагрузкам. Стальные литые детали подвижного состава железнодорожного транспорта, изготавливаемые из стали Гадфильда, подвергаются большим динамическим и ударным нагрузкам и при этом работают при неблагоприятных погодных условиях на открытом воздухе, в широком диапазоне температурных режимов, в том числе при отрицательных температурах. Актуальной задачей является повышение

эксплуатационной стойкости таких деталей путем обеспечения более высоких свойств стали и особенно её ударной вязкости и разработка новых технологических приемов, повышающих эксплуатационные свойства стальных отливок. В последнее время наблюдается ужесточение требований к литым стальным деталям для железнодорожного транспорта в направлении повышения механических свойств, что пока не обеспечивается действующими технологиями их изготовления.

Целью данного обзора является критический анализ исследований, посвященных механизмам упрочнения и пластичности стали Гадфильда, выявление описанных в научной литературе основных факторов, влияющих на формирование микроструктуры и механические свойства стали Гадфильда, чтобы представить последние достижения в этой области и вызовы, связанные с перспективами их промышленного внедрения. В частности, особое внимание уделяется анализу влияния параметров дислокационных субструктур и химического состава стали Гадфильда на механизмы ее упрочнения и пластичности с целью выявить закономерности, которые позволят дать рекомендации по термической обработке стали или по допустимым и желательным отклонениям в ее химическом составе. Ожидается, что данный обзор будет стимулировать более тесное сотрудничество между исследователями в различных областях, включающих производство, обработку и исследование свойств стали Гадфильда, а также способствовать дальнейшим разработкам для внедрения в производство.

Для анализа в данном обзоре использованы достоверные открытые источники информации за последние 10 лет, включающие в основном исследовательские статьи в рецензируемых научных журналах.

Литературный обзор. Среди износостойких высокоуглеродистых марганцовистых сплавов особое место занимает аустенитная высокомарганцевая сталь Гадфильда со средним содержанием углерода 1,2 % и марганца 12 %. Благодаря высокой прочности, хорошей гибкости и износостойкости, эта сталь широко используется в различных отраслях промышленности, например: для дробления горных пород, устройства железнодорожных переездов, изготовления черпаков экскаваторов, траков гусениц и разнообразных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта, подвергающихся ударным нагрузкам и повышенному износу [1-3]. Сталь Гадфильда изготавливается методом литья. В отливках без термической обработки структура данной стали состоит из аустенитной и карбидной фаз, при этом карбидная фаза, как правило, выделяется по границам зерен и приводит к хрупкости отливки. Для устранения этого недостатка обычно применяют отжиг при 1050-1150 °С (в зависимости от конкретного элементного состава стали) с закалкой в воду, чтобы предотвратить повторное зернограничное осаждение карбидов [3]. Для обеспечения оптимальной ударной вязкости структура стали Гадфильда должна быть аустенитной однофазной [4-6]. Допустимо небольшое количество мелких карбидов в аустенитной матрице с равномерно распределенными углеродом и марганцем. С другой стороны, наличие карбидов повышает стойкость стали Гадфильда к абразивному износу [7-9]. Таким образом, сталь Гадфильда сочетает в себе стойкость к абразивному износу и высокую ударную вязкость.

Отличительной особенностью стали Гадфильда является её резко выраженная способность к деформационному упрочнению. Основным механизмом упрочнения Гадфильда при пластической деформации является скопление дислокаций (дислокационные скопления могут образовывать очень компактные клубки с увеличением степени деформации) и образование двойников [10]. Кристаллографические плоскости скольжения с высокой плотностью дислокаций обычно называют полосами скольжения [11]. Высокая скорость

деформационного упрочнения данной стали обусловлена деформационным превращением аустенита (γ -фаза) в α - или ε -мартенсит, механическим двойникованием, динамическим деформационным старением и блокированием дислокаций дефектами упаковки [2, 6, 12]. Значения энергии дефектов упаковки (ЭДУ) можно контролировать определенными методами в определенном диапазоне, поскольку они связаны с химическим составом и в основном зависят от объемного процента марганца и углерода [6, 7, 9, 13]. Отмечается также, что добавка азота (в том числе азота в твердом растворе и в виде осадка) перспективна для этой стали, так как повышает ее механическую прочность без изменения пластичности [12].

Исследованию стадий пластической деформации аустенитных сталей посвящены исследования Ян (Yan) и др. [14] и Ли (Lee) и др. [15], в которых использован подход, основанный на сопоставлении зависимости деформационного упрочнения от микроструктуры деформируемого материала, при этом общее упрочнение стали рассматривается как линейная суперпозиция вкладов твердорастворного упрочнения, дислокаций и двойников. Отмечается, что большинство вкладов в упрочнение связано с действием определенного механизма деформации, которому отвечает свой тип дефектной субструктуры, при этом условием обособления какой-либо стадии пластического течения является постоянство коэффициента деформационного упрочнения. Таким образом, можно предположить, что стадии деформационной кривой при пластической деформации стали Гадфильда также зависят от типа дислокационной структуры, который определяет значения коэффициента деформационного упрочнения в аустенитных сталях.

При исследовании дислокационной структуры поликристаллов аустенитных нержавеющей сталей ранее было установлено, что одновременно с плоскими скоплениями дислокаций наблюдаются дефекты упаковки [14-17] и была показана роль дефектов упаковки, как упрочняющих элементов дислокационной структуры. Если при развитии дислокационной структуры в ходе деформации образуются микродвойники, плотность которых с ростом деформации увеличивается, то они также могут приводить к дополнительным эффектам упрочнения. Также увеличение степени пластической деформации в аустенитных сталях сопровождается ростом уровня напряжений и сменой механизма деформации от скольжения к двойникованию, которое может стать основным механизмом деформации. С другой стороны, увеличение числа действующих систем двойникования может определять стадии кривых течения и непосредственно коэффициент деформационного упрочнения. Так, известно [14, 16, 17], что если двойникование будет развиваться после деформации скольжением, то в этом случае будет наблюдаться конкуренция поперечного скольжения и двойникования. Развитие двойникования в одной системе после скольжения будет подавлять процессы поперечного скольжения и приводить к увеличению пластичности кристаллов, то есть будет наблюдаться так называемый TWIP-эффект (twinning-induced plasticity – пластичность, наведенная двойникованием). Вызовом для конструкционного применения в промышленности сталей с TWIP-эффектом является их низкий предел текучести (~300 МПа) [18], при этом обычные механизмы упрочнения вызывают повышение предела текучести, но также и серьезное снижение пластичности [11]. Предположительно, при деформации такой стали и развитии двойникования при достижении предела текучести в одной системе следует ожидать незначительного повышения пластичности, тогда как развитие двойникования в нескольких системах может гипотетически привести к повышению пластичности, сопровождающемуся заметным снижением коэффициента деформационного упрочнения.

Брэке (Bracke) и соавторы [19] изучали влияние холодной прокатки на микроструктуру аустенитной марганцовистой стали Гадфильда и анализировали закономерности структурных изменений в процессе этой обработки и их влияние на механические свойства стали, а также механизмы, обеспечивающие повышение прочности этих сталей за счет деформационного воздействия. Было показано, что при степени деформации $\varepsilon=0,10$ двойники появляются в виде прямых линий. На данном этапе прямые деформационные двойники уже присутствуют в более чем половине зёрен. В основном, лишь одна система двойникования активирована в каждом зерне; система двойникования имеет подходящую ориентацию по отношению к направлению прокатки. Двойники формируются на плоскостях $\{111\}$ с максимальным получаемым напряжением. В зернах, свободных от деформационных двойников, наблюдается высокая плотность плоских дислокационных структур.

Никулина и др. [20] исследовали структурные изменения в стали Гадфильда при холодной деформации. Показано, что упрочнение стали обусловлено образованием скоплений дислокаций, генерацией дефектов упаковки и двойников. Установлено, что после деформации прокаткой со степенью обжатия 40 % в стали Гадфильда (13,42 % Mn, 1,2 % C, 0,71 % Si, остальное Fe) формируются области с нанокристаллическими структурами с гранцентрированной кубической (ГЦК) и гексагональной плотноупакованными решетками.

Несмотря на то, что деформационное упрочнение сталей Гадфильда исследовалось на протяжении десятилетий, интерес к фундаментальным вопросам механизмов ее упрочнения в настоящее время не уменьшается.

Чтобы увеличить пластичность стали с TWIP-эффектом, Чжи (Zhi) и соавторы (2020) ввели градиентные подструктуры (ГП) в стали Гадфильда состава Fe-22Mn-0,6C и исследовали эволюцию и механические свойства GS[21]. Испытания на одноосное растяжение показали, что в ГП одновременно было получено сочетание высокого предела текучести и высокого предела прочности за счет дислокационного упрочнения с накоплением высокой плотности дислокаций.

Ким (Kim) и др. (2019) использовали *in-situ* ПЭМ (просвечивающую электронную микроскопию «на месте») для прямого наблюдения пластичности дислокаций в легкой стали с высоким содержанием марганца. Было установлено, что пластическая деформация аустенитной стали Fe-Mn-Al-C сопровождалась выраженным плоским скольжением дислокаций с последующим образованием полос скольжения с очень плотными дислокационными стенками [11]. При пластической деформации этой стали не наблюдалось ни мартенситных превращений, ни деформационных двойников, но наблюдалось локализованное поперечное скольжение дислокаций на пересечении полос скольжения, т. е. полосы скольжения распространялись в зерне, не блокируя друг друга. Таким образом, анализом ПЭМ деформации на месте было подтверждено, что улучшенное деформационное упрочнение стали связано с выраженным плоским скольжением, которое расширяет область стадии деформации.

Жилкашинова и др. (2021) установили закономерности изменения микроструктуры и фазового состава высокомарганцевой стали 110Г13Л в зависимости от содержания масс. % основных компонентов (Mn, C). В частности, в группах сталей с содержанием C в пределах 1,0-1,2 масс. % и группы сталей с содержанием углерода 0,4-0,5 масс. % концентрация Mn изменялась в пределах от 6 до 18 масс. % [22]. Как было показано авторами [22], увеличение в стали масс. % C стабилизирует аустенит. Таким образом, стали, близкие по составу к стали Гадфильда, с содержанием Mn от 10 масс. % до 18 % и с 1,0-1,2 масс. % C остаются аустенитными не только после закалки, но и после

пластической деформации прокаткой со степенью деформации до 60 %. При этом значение средней скалярной плотности дислокаций при равных степенях деформации прокаткой было прямо пропорционально концентрации C , тогда как увеличение содержания Mn практически не повлияло на среднюю скалярную плотность дислокаций γ -фазы. Полученные авторами [22] результаты согласуются с результатами фундаментальных исследований Цакириса (Tsakiris) и Эдмондса (Edmonds) [23], в которых была найдена плотность дислокаций в аустените до мартенситного превращения – порядка 10^{13} м^{-2} при комнатной температуре. Однако, можно предположить, что, повысив точность измерений скалярной плотности дислокаций в клубках, можно было бы получить более высокие значения ρ . На основании предложенного Монтейро (Monteiro) и соавторами (2020) метода оценки плотности дислокаций в сильно уплотненных клубках было предварительно установлено максимальное значение плотности дислокаций $(4 \pm 2) \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ для металлических материалов. Указано, что железоуглеродистый мартенсит, являющийся самой твердой из известных металлических фаз, имеет плотность дислокаций порядка 10^{15} м^{-2} , при этом увеличение содержания Mn практически не влияло на среднюю скалярную плотность стали [24]. Таким образом, измеренные авторами [22] величины плотности дислокаций косвенно подтверждают отсутствие мартенситного превращения в данной стали Гадфильда при деформации, в противном случае, судя по литературе [10, 11, 20, 23], плотность дислокаций была бы существенно выше.

Обсуждение основных результатов. В настоящее время роль дислокационной и двойниковой субструктур в поведении деформационного упрочнения в целом хорошо смоделирована и изучена. Полный анализ экспериментальной литературы и обобщение современных концепций моделирования в области деформационного поведения гранцентрированных кубических сплавов $g\text{-Fe}$ с высоким содержанием марганца выполнен Де Куман (DeCooman) и др. в обзорной статье [10]. Как отмечают авторы обзора [10], существуют значительные различия между моделями, предложенными для эволюции микроструктуры во время деформации сталей с TWIP-эффектом и сопутствующего поведения деформационного упрочнения. Однако, как следует из результатов данного обзора, экспериментальные характеристики эволюции деформационной субструктуры, а также подробная количественная оценка их соответствующих ролей в деформационном упрочнении стали Гадфильда во время деформации растяжением приводятся в литературе еще редко. Следовательно, актуальной и научно новой является задача установления структурных изменений аустенитной стали Гадфильда в результате механического воздействия растяжением и прокаткой и оценки количественных параметров ее дислокационных субструктур, также как оценка влияния механизма деформации (скольжения и двойникования) и формирующихся при деформации субструктур на деформационное упрочнение данной стали.

Особенно важным представляется анализ влияния состава стали на изменения ее микроструктуры и свойств. Очевидно, что малые изменения химической композиции стали Гадфильда в пределах, допустимых ГОСТ, могут сыграть решающую роль в изменении механизмов ее деформации и упрочнения. Намечены пути исследования данного влияния, показано, концентрация каких элементов и каким именно образом изменяет свойства стали. Необходимым представляется продолжить исследование влияния отклонения в химическом составе стали на ее склонность к разрушению, что может быть критически важным при эксплуатации литых деталей, в частности, в железнодорожном транспорте.

Экспериментальные факты и теоретические соображения данного обзора вносят вклад

в современную картину деформационных процессов в сталях с TWIP-эффектом, в которых важную роль играет деформационное двойникование. В частности, приведенные в данном обзоре экспериментальные данные о параметрах дислокационных субструктур (ДСС) в сталях Гадфильда и их интерпретация проясняют для читателей вопросы механизмов деформации сталей с TWIP-эффектом и описывающие их модели. Результаты обзора также полезны для разработки и получения структур с высокой прочностью и пластичностью в других системах сталей с повышенным содержанием марганца (магналлоев). Авторы данного обзора планируют применить указанные здесь методы оценки (по электронно-микроскопическим изображениям) связи стадий деформации с параметрами дислокационной субструктуры стали Гадфильда для анализа образцов после ударного разрушения, дополнив исследование фраттографией. Будущее исследование имеет целью объединить данные о связи параметров субструктуры с механизмами разных типов деформации стали Гадфильда 20ГЛ, чтобы получить фундаментальное понимание механизмов деформации аустенитной стали с высоким содержанием марганца.

Заключение. Обзор современной литературы показал растущие потребности производств, выпускающих и использующих стали Гадфильда, в понимании и практическом применении механизмов упрочнения и пластичности данной стали и выявил основные факторы, влияющие на формирование микроструктуры и механические свойства стали Гадфильда. Было показано влияние параметров дислокационных субструктур и химического состава стали Гадфильда на механизмы ее упрочнения и пластичности и выявлены закономерности, которые позволяют дать рекомендации по термической обработке стали или по допустимым и желательным отклонениям в ее химическом составе в зависимости от области применения стального изделия. В обзоре были представлены последние достижения в области формирования требуемых микроструктур и, соответственно, механических свойств стали Гадфильда, показаны вызовы, связанные с перспективами промышленного внедрения новых разработок, и перспективы дальнейшего направления исследований. Таким образом, данный обзор стимулирует более тесное сотрудничество между исследователями в различных областях, включающих производство, обработку и исследование свойств стали Гадфильда, а также может способствовать дальнейшим разработкам для внедрения в производство.

Благодарность. Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP14973060).

References

1. Olawale J.O., Ibitoye S.A., Shittu M.D., Workhardening behaviour and microstructural analysis of failed austenitic manganese steel crusher jaws // Mater Res. – 2013. – 16(6). – Pp. 1274-1281. – DOI:10.1590/S1516-14392013005000144.
2. Allende-Seco R., Artigas A., Bruna H., Carvajal L., Monsalve A., Sklate-Boja M.F., Hardening by transformation and cold working in a Hadfield steel cone crusher liner // Metals. – 2021. – 11(6). – 961. – <https://doi.org/10.3390/met11060961>.
3. Winarto E.W., Darmo S., Santoso N., Setyana L.D., The Improvement of impact on manganese steel for bucket tooth product // International Conference of Technology for Sustainable Development (ICTSD). – 2019. – Pp. 78-83. – DOI 10.18502/kss.v3i23.5138.
4. Sabzi M., Farzam M., Hadfield manganese austenitic steel: a review of manufacturing processes and properties // Mater Res Express 6:1065c2, 2019. – <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab3ee3>
5. Srivastava A.K., Das K., Microstructural characterization of Hadfield austenitic manganese steel // J Mater Sci. – 2008. – 43(16). – Pp. 5654-5658. – DOI:10.1007/s10853-008-2759-y.
6. Průcha V., Jansa Z., Šimeček J., Žďánský O., Kříž A., Characterization of microstructure of Hadfield steel // Solid State Phenom 270. – 2017. – Pp. 265-270. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.270.265>.

7. Gürol U., Can Kurnaz S., Effect of carbon and manganese content on the microstructure and mechanical properties of high manganese austenitic steel // *J Min Metall Sect B-Metall.* – 56(2). – Pp. 171-182. – <https://vuzhshyucnp/10.2298/JMMB191111009G>.
 8. Varela L.B., Tressiaa G., Bortoleto E.M., Sinatora A., Abrasion wear resistance of modified Hadfield steels // *46th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 2-4 September, 2019.*
 9. Průcha V., Kříž A., Žďánský O., Vnouček M., Analysis of fractured weldment of Hadfield steel // *Manuf Technol.* – 2019. – 19(26). – Pp. 308-313. – DOI: 10.21062/ujep/288.2019/a/1213-2489/MT/19/2/308
 10. Cooman B.C.D., Estrin Y., Kim S.K., Twinning-induced plasticity (TWIP) steels // *Acta Mater* 142, 2018. – Pp. 283-362. – 10.1016/j.actamat.2017.06.046.
 11. Kim S.D., Park J.Y., Park S.J. et al., Direct observation of dislocation plasticity in high-Mn lightweight steel by in-situ TEM // *Sci. Rep.* 9:15171, 2019. – DOI: 10.1038/s41598-019-51586-y.
 12. Kang J., Zhang F.C., Deformation, fracture, and wear behaviors of C+N enhancing alloying austenitic steels // *Mater Sci. Eng. A*, 558, 2012. – Pp. 623-631. DOI:10.1016/j.msea.2012.08.063.
 13. Lee W-S., Chen T-H., Plastic deformation and fracture characteristics of Hadfield steel subjected to high-velocity impact loading // *Proc. Inst. Mech. Eng.* 1989-1996 (203-210), 216 (10), 2002. – Pp. 971-982. – DOI:10.1243/095440602760400940.
 14. Yan K., Carr D.G., Callaghan M.D., Liss K-D., Li H., Deformation mechanisms of twinning-induced plasticity steels: In situ synchrotron characterization and modeling // *Scr. Mater.* – 2009. – 62(5). – Pp. 246-249. – <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.11.008>.
 15. Lee T.H., Shin E., Oh C.S., Ha H.Y., Kim S.J., Correlation between stacking fault energy and deformation microstructure in high-interstitial-alloyed austenitic steels // *Acta Mater.* – 2017. – 58. – Pp. 3173-3186. – DOI:10.1038/s41598-017-11328-4.
 16. Tol R.T., Zhao L., Schut H., Sietsma J., Investigation of deformation mechanisms in deep-drawn and tensile-strained austenitic Mn-based twinning induced plasticity (TWIP) steel // *Metall Mater Trans A* 43(9), 2012. – Pp. 3070-3077. – DOI: 10.1007/s11661-012-1123-7.
 17. Bouaziz O., Allain S., Scott C.P., Effect of grain and twin boundaries on the hardening mechanisms of twinning-induced plasticity steels // *Scr Mater* 58(6), 2008. – Pp. 484-487. – <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.10.050>.
 18. Jeong K., Jin J-E., Jung Y-S., Kang S., Lee Y.K., The effects of Si on the mechanical twinning and strain hardening of Fe-18Mn-0.6C twinning-induced plasticity steel // *Acta Mater* 61, 2013. – Pp. 3399-3410. – DOI:10.1016/j.actamat.2013.02.031.
 19. Bracke L., Kestens L., Penning J., Direct observation of the twinning mechanism in an austenitic Fe-Mn-C steel // *Scr Mater* 61(2), 2009. – Pp. 220-222. – <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.03.045>.
 20. Nikulina A.A., Smirnov A.I., Velikosel'skaya E.Yu., Structural changes in Hadfield steel under cold deformation // *J Surf Investig* 7(1), 2013. – Pp. 172-177. – DOI:10.1134/S1027451013010308.
 21. Zhi H., Zhang C., Guo Z., Antonov S., Su Y., Outstanding tensile properties and their origins in twinning-induced plasticity (TWIP) steels with gradient substructures // *Materials* 13(5), 2020. – Pp. 1184. – doi: 10.3390/ma13051184.
 22. Zhilkashinova A., Skakov M., Abilev M., Yerbolatuly D., Effect of alloying elements on the structural phase state of Hadfield steel // *J. Mater. Civ. Eng.* 33(11), 2021. – DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003951.
 23. Tsakiris V., Edmonds D.V., Martensite and deformation twinning in austenitic steels // *Mater. Sci. Eng. A*. 273-275, 1999. – Pp. 430-436. – [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00322-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00322-6).
 24. Monteiro S.N., Brandão L.P., de Sousa T.G., da Costa Garcia Filho F., Novel methods for dislocation density estimation in highly compacted tangles // *J Mater Res Technol.* 9(2), 2020. – Pp. 2072-2078. – <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.040>.
-
-