

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.15-194.2:621.785.4

В. И. ЗУРНАДЖИ^{1*}, В. С. ВОЛОШИН^{2*}, Р. А. КУССА^{3*}, В. Г. ЕФРЕМЕНКО^{4*},
А. В. ДЖЕРЕНОВА^{5*}, Е. В. ЦВЕТКОВА^{6*}

^{1*}Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта vadim.zurnadzy@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

^{2*}Каф. «Охрана труда и окружающей среды», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 65 55, эл. почта rector@pstu.edu, ORCID 0000-0002-9922-5618

^{3*}ЧАО «МК «АЗОВСТАЛЬ», ул. Лепорского, 1, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта kussaroman1@gmail.com, ORCID 0000-0001-9003-2003

^{4*}Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

^{5*}Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта dzherenovs.all@gmail.com, ORCID 0000-0002-4249-4147

^{6*}Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта tsvetkova.elena.0957@gmail.com, ORCID 0000-0001-5216-6641

СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ С TRIP-ЭФФЕКТОМ

Цель. Основной целью данной работы является выполнение на основе последних литературных данных анализа современного состояния вопроса о направлениях в разработке химического состава и режимов термической обработки сталей, реализующих TRIP-эффект при нагружении. Благодаря протеканию деформационного мартенситного превращения остаточного аустенита эти стали обладают повышенным комплексом механических и эксплуатационных свойств при достаточно экономном легировании. **Методика.** В работе использованы сведения, полученные из опубликованной за длительный период времени научной литературы, включая отечественные источники и высокорейтинговые зарубежные издания. Сведения систематизированы по основным типам TRIP-сталей и касаются их химического состава и технологии термической обработки. **Результаты.** Представлена история развития исследований по разработке конструкционных сталей, использующих TRIP-эффект, а именно: высоколегированных однофазных метастабильных аустенитных сталей, а также низколегированных многофазных TRIP-assisted сталей, в которых TRIP-эффект играет вспомогательную роль как дополнительный механизм упрочнения и обеспечения повышенной пластичности. К последней группе сталей относятся: низколегированные TRIP-assisted стали, δ -TRIP-стали и мартенситно-старяющие TRIP-стали. Описаны типичные схемы легирования и применяемые схемы термической обработки, позволяющие достигнуть в сталях оптимальных соотношения фазово-структурных составляющих, количества и степени стабильности остаточного аустенита к деформационному мартенситному превращению и, как результат, – обеспечить повышенный комплекс механических и эксплуатационных свойств. Отмечена ключевая роль формирования бескарбидной структуры, достигаемой легированием кремнием и/или алюминием, в обеспечении высоких свойств стали. Показана перспективность применения современных конструкционных сталей, реализующих TRIP-эффект, в автомобилестроении и в машиностроительной отрасли. Даны рекомендации по дальнейшим направлениям исследований в данной области. **Научная новизна.** В статье проведен анализ и систематизация актуальных литературных данных о направлениях в разработке технологий получения многофазных конструкционных сталей с остаточным метастабильным аустенитом, реализующих TRIP-эффект при нагружении. **Практическая значимость.** Результаты,

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

полученные в рамках данной работы, могут быть использованы в качестве справочных материалов при решении конструкторских задач, а также в образовательных целях при подготовке профильных специалистов по инженерным специальностям.

Ключевые слова: высокопрочные стали; метастабильный аустенит; TRIP-эффект; термообработка

Вступление

Задача повышения эффективности производства современных высокопрочных сталей не теряет своей актуальности. Ее решение подразумевает экономию энергетических и сырьевых ресурсов, в том числе за счет оптимизации химического состава и технологии термической обработки стального проката. В настоящее время разработан и опробован целый ряд технологических подходов, нацеленных на получение в конструкционных сталях многофазных структурных состояний с повышенным количеством остаточного аустенита, склонного к проявлению TRIP-эффекта (Transformation Induced Plasticity – пластичность, наведенная превращением) [25, 34]. Такой аустенит претерпевает мартенситное превращение при деформации, что приводит к значительному росту прочности при сохранении достаточно высокой пластичности и вязкости стали. В отечественной литературе в недостаточной мере освещено современное состояние вопроса по разработке и применению конструкционных сталей с TRIP-эффектом, поэтому анализ этого вопроса представляет определенный интерес.

Цель

Основной целью статьи является аналитический обзор литературных данных о направлениях в разработке химического состава и режимов термической обработки современных конструкционных сталей, реализующих TRIP-эффект при нагружении.

Методика

В статье представлена история развития направления исследования конструкционных TRIP-сталей. Использованные данные почерпнуты из отечественных источников и ведущих зарубежных журналов материаловедческой направленности. На основании анализа данных выделены основные направления разработки современных сталей с реализацией TRIP-

эффекта, а также рассмотрены перспективы адаптации технологий их термообработки к промышленным условиям.

Результаты

Начало изучения TRIP-эффекта относится к первой половине прошлого века, когда Sheil открыл мартенситное превращение в Fe–Ni сталях под действием напряжений (1932 г.), а Wassermann впервые описал кристаллографию $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, протекающего в никелевой стали при растяжении (1933 г.). Основы современных представлений о TRIP-эффекте и его практическом использовании для повышения механических свойств сталей были заложены в 50–60-х годах работами уральской школы металлургов под руководством Богачева [1], а также исследованиями зарубежных ученых (Patel, Cohen, Houdremont, Krisement, Lihl и др.). Впоследствии эти исследования были продолжены и развиты в работах Малинова, Zackay, Parker, Филиппова, Попова, Matsumura, Чейляха, Sugimoto, White, Sakuma и других авторов [5, 6]. На первых этапах исследования развивались в направлении разработки однофазных γ -сталей, в которых метастабильный аустенит получали за счет введения большого количества легирующих элементов (Ni, Mn, Cr, Mo). Более перспективным направлением стало создание безникелевых МАС(метастабильный аустенит)-сталей систем легирования Fe–C–Mn, Fe–C–Mn–Cr, Fe–C–Mn–Cr–N, что позволяло использовать TRIP-эффект при снижении затрат на легирование. В зависимости от химического состава предел прочности безникелевых МАС-сталей варьируется в интервале 600–1750 МПа, при этом относительное удлинение достигает 50 % [2]. Универсальность концепции МАС-сталей была подтверждена многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых, убедительно доказавших высокую эффективность метастабильного аустенита в повышении не только механических свойств, но и эксплуатационной долговечности стальных и чугуновых изделий, работаю-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

щих в условиях деформации поверхности при кавитации, трении, абразивном и ударно-абразивном изнашивании [4, 14, 23]. Тем не менее широкое внедрение МАС-сталей сдерживалось их высокой стоимостью.

В 80-х годах Matsumura (Nippon Steel Corporation) с целью дальнейшего удешевления металлопродукции при сохранении максимально высокого комплекса механических свойств выполнил комплекс исследований в направлении разработки многофазных сталей с повышенным количеством метастабильного остаточного аустенита [29]. В результате была предложена и развита концепция получения низколегированных сталей с многофазной структурой, в которых TRIP-эффект используется лишь как один из механизмов упрочнения. Для обозначения сталей этого класса был введен термин «TRIP-assisted» (или «TRIP-aided») [8, 33]. Содержание аустенита в TRIP-assisted сталях ограничено 5–20 % [33], что, тем не менее, позволяет получать в них повышенный комплекс свойств, недостижимый в сталях с низким уровнем легирования. Классический химический состав TRIP-assisted сталей лежит в диапазоне 0,15–0,4 % C; 1,0–2,5 % Si (или Al); 1–2 % Mn [15]. Низкое содержание углерода в данных сталях (как правило, не более 0,2 %) обусловлено необходимостью обеспечения их хорошей свариваемости [15]. Для стабилизации аустенита в TRIP-assisted сталях используют выдержку в бейнитном интервале температур после предварительного нагрева в межкритический интервал. TRIP-assisted стали вошли в группу высокопрочных AHSS сталей (AHSS – Advanced High-Strength Steel) первого поколения [15], и в настоящее время широко используют в автомобилестроении.

Концепция низколегированных TRIP-сталей получила мощное развитие в конце 80 – начале 90-х годов в связи с возникшей потребностью зарубежного автопрома в листовой стали повышенной прочности и штампуемости. Эта потребность была связана со взятым ведущими автомобильными компаниями мира направлением на кардинальное снижение веса автомобиля и расхода горючего. Преимуществом TRIP-assisted сталей является сочетание высокой прочности и удовлетворительной пластичности, достигаемое наличием повышенного ко-

личества остаточного аустенита и оптимальной степенью его стабильности к деформационному мартенситному превращению. Низкое отношение σ_T/σ_B (0,5–0,6) обеспечивает этим сталям хорошую штампуемость, а упрочнение при деформации – высокую прочность в готовом изделии, что позволяет снижать толщину листа, облегчая вес автомобиля.

Ключевым моментом в формировании конечной структуры TRIP-assisted сталей является получение бескарбидного бейнита, поскольку цементитные включения являются концентраторами напряжений и облегчают зарождение и развитие трещин. Для получения такой структуры большинство современных высокопрочных сталей, использующих TRIP-эффект, легируют кремнием или алюминием в количестве 1–2 % [10]. Кремний подавляет выделение цементита из аустенита на стадии изотермической выдержки, что позволяет насытить аустенит углеродом и увеличить долю остаточного аустенита по завершении термической обработки. Способность кремния подавлять выделение цементита объясняется его чрезвычайно низкой растворимостью в последнем [11]. Кроме того, кремний значительно повышает коэффициент активности углерода в феррите и аустените, а также снижает растворимость углерода в феррите. При температурах бейнитной выдержки кремний имеет низкую способность к диффузии на дальние расстояния [11]. Следовательно, накопление кремния вокруг зародыша цементита может значительно повысить локальную активность углерода и увеличить свободную энергию системы, предотвращая диффузию углерода к зародышу цементита [7]. Торможение выделения цементита под влиянием кремния описано в работах Курдюмова [3], Bhadeshia [7], Caballero [11] и других. Существенным недостатком легирования большим количеством кремния является формирование прочного слоя марганце-кремниевых оксидов, которые закатываются в поверхность металла во время горячей прокатки [27]. Это препятствует нанесению антикоррозионного покрытия: формирующиеся при содержании кремния свыше 0,5 % окисные пленки не позволяют покрыть сталь цинком во время горячего цинкования и, как следствие, вызывают появление на поверхности листа оголенных участков [26, 30].

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В попытках решения этой проблемы кремний стараются заменять алюминием. Алюминий так же, как и кремний, не растворяется в цементите и является сильным стабилизатором феррита, увеличивает время образования карбидов и снижает термодинамическую стабильность цементита [9]. Кроме того, алюминий ускоряет бейнитное превращение [16]. В отличие от кремния, алюминий не препятствует нанесению гальванических покрытий при содержании до 1,5 % [28]. Легирование стали большим количеством алюминия способствует более сильному насыщению остаточного аустенита углеродом [27]. Недостатками использования алюминия являются низкая степень твердорастворного упрочнения [20] и значительное повышение температуры начала мартенситного превращения [26].

Не менее важным элементом с точки зрения современных TRIP-assisted сталей является марганец. Его основная роль заключается в увеличении прокаливаемости и росте количества остаточного аустенита [13]. Вместе с тем слишком высокое содержание марганца приводит к полосчатой структуре и чрезмерной стабилизации остаточного аустенита, поэтому количество этого элемента в TRIP-assisted сталях не превышает 2,5 % [22]. Содержание марганца свыше 2 % также затрудняет нанесение цинкового покрытия даже в отсутствие кремния [30].

После прокатки TRIP-assisted стали подвергают термической обработке, которую проводят в два этапа (рис. 1). Первый заключается в нагреве в межкритический интервал (МКИ) температур (т. е. между точками A_{c1} и A_{c3}) для получения аустенито-ферритной структуры с примерно равной долей фаз [9]. Во время выдержки в МКИ углерод перераспределяется из феррита в аустенит, в результате чего концентрация углерода в последнем повышается до 0,3–0,4 % [13]. Следующий этап заключается в изотермической выдержке при температурах бейнитного превращения (300–500 °C) [13], которую можно совмещать со смоткой в рулоны. В результате превращения количество аустенита уменьшается, однако содержание углерода в оставшейся части аустенита возрастает до 1–1,5 % [13], что стабилизирует его к дальнейшему превращению [39]. При длительных выдержках в интервале 400–500 °C содержание уг-

лерода в остаточном аустените может достигать 1,5–2,0 % [13]. Причиной обогащения аустенита углеродом является его низкая растворимость в бейнитном феррите и подавление выделения карбидов из аустенита введением кремния и(или) алюминия. После указанной термической обработки TRIP-assisted стали имеют структуру, состоящую из 40–60 % феррита, 35–45 % бескарбидного бейнита и высокоуглеродистого остаточного аустенита, залегающего между пластинами бейнитного феррита (возможно присутствие и некоторой доли мартенсита) [19] (рис. 2). В зависимости от легирования, в структуре также могут присутствовать дисперсные специальные карбиды. Формирование многофазной «композитной» структуры вызывает перераспределение напряжений между фазами из-за различий в их пластических свойствах, что существенно влияет на поведение стали при деформации [21]. Такая структура обеспечивает достижение предела прочности 850–1000 МПа при удлинении 20–30 %.

Комплекс свойств AHSS сталей зачастую оценивают показателем PSE (Product of Strength and Elongation), представляющим собой произведение предела прочности на относительное удлинение. Для TRIP-assisted сталей значение PSE составляет 18–25 ГПа·%. Данный класс сталей освоен производителями стального проката, в частности компания «US Steel Corporation» предлагает тонколистовую сталь TBF 980 (TRIP Assisted Bainite-Ferrite), обладающую следующими свойствами: $\sigma_b = 1010$ МПа, $\sigma_{0,2} = 820$ МПа, $\delta = 14$ %. Дополнительное повышение свойств обеспечивают введением микродобавок ниобия, ванадия и титана, что позволяет формировать нанодисперсные карбидные и карбонитридные упрочняющие включения [18].

К преимуществам низколегированных TRIP-assisted сталей можно отнести достаточно высокий комплекс свойств при низкой стоимости, а также высокие технологические свойства, такие как штампуемость и свариваемость. Тем не менее, наличие мягких структурных составляющих (феррита и аустенита) снижает предел текучести, что сужает сферу применения данных сталей.

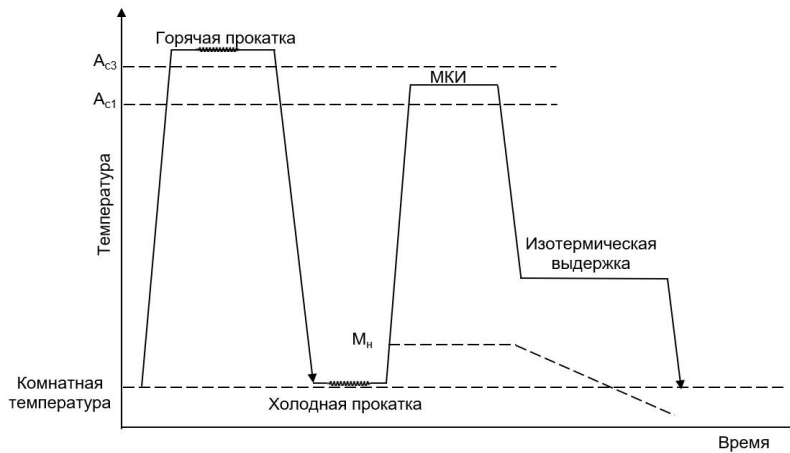


Рис. 1. Схема термической обработки TRIP-assisted сталей

Fig. 1. Scheme of heat treatment of TRIP-assisted steels

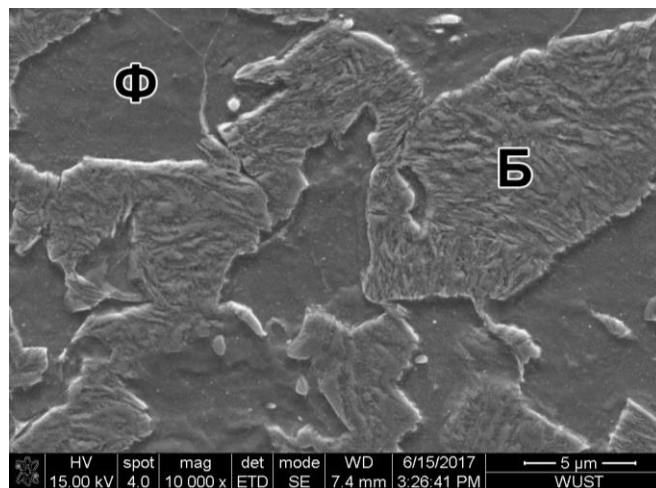


Рис. 2. Микроструктура TRIP-assisted стали после двухстадийной термообработки с нагревом в межкритическом интервале температур (Ф – феррит, Б – бескарбидный бейнит)

Fig. 2. Microstructure of TRIP-assisted steel after two-stage heat treatment with heating in the intercritical temperature range (Ф – ferrite, Б – carbide-free bainite)

Как было сказано выше, классические TRIP-assisted стали, как правило, имеют микроструктуру, состоящую из аллотриоморфного (т. е. зарождающегося по границам зерен) феррита, реечного бейнитного феррита и остаточного аустенита. В 2007 году Chatterjee и Bhadeshia предложили концепцию δ -TRIP-assisted сталей, в которых аллотриоморфный феррит заменен на δ -феррит, формирующийся в виде дендритов из жидкой фазы [12]. Такой феррит стабилен к превращению при температурах вплоть до 900–1 200 °C [38] и остается в структуре стали после термической

обработки [36]. Стабилизацию δ -феррита обеспечивают легированием, аналогичным классической TRIP-assisted стали, но при повышенном до ~0,4 % содержании углерода и 2–4 % алюминия [12, 37]. В литом состоянии эти стали имеют структуру, состоящую из дендритов δ -феррита и перлита [12], что обеспечивает высокий (с учетом относительно низкого содержания легирующих элементов) комплекс механических свойств. δ -TRIP сталь, содержащая 0,36 % C, 1,96 % Mn, 0,73 % Si, 2,22 % Al, 0,022 % P, 0,52 % Cu, в литом состоянии имеет предел прочности 1 000 МПа при удлинении

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

27 % [12], что делает возможным применение этих сталей в литом состоянии.

Термическая обработка δ -TRIP сталей аналогична классическим TRIP-assisted сталям. Микроструктура в термообработанном состоянии имеет несколько уменьшенное, по сравнению с литым состоянием, количество дендритов δ -феррита, пластинчатого бейнитного феррита и остаточного аустенита. Такая структура обеспечивает стали, содержащей 0,39 % C, 0,21 % Si, 0,51 % Mn, 3,84 % Al, предел прочности 661 МПа при удлинении 41 % [37]. Кроме относительно высокого уровня механических свойств, δ -TRIP стали имеют ряд преимуществ, делающих их перспективными для более широкого промышленного применения. Речь идет о снижении плотности стали за счет легирования алюминием [35]. Добавление 3,5 % Al снижает плотность на ≈ 5 % [35], что особенно актуально для автомобильной отрасли, где стремятся снизить массу деталей (при сохранении прочностных свойств) с целью снижения расхода топлива и выбросов парниковых газов в атмосферу. Кроме того, в δ -TRIP сталях при сварке в зоне термического влияния невозможно получить полностью мартенситную структуру, что положительно сказывается на свариваемости стали и короблении сварных конструкций [37].

Еще одним современным вектором развития данного направления являются мартенситно-стареющие TRIP-стали (Maraging-TRIP), концепция которых была предложена Raabe в 2009 году [32]. Эта концепция позволяет сочетать высокую прочность, обеспечиваемую упрочнением наноразмерными интерметаллидными частицами, выделяющимися при старении мартенсита, с высокой пластичностью за счет реализации TRIP-эффекта [31, 32]. Комбинация этих эффектов обеспечивается особой системой легирования. Как правило, в мартенситно-стареющих TRIP-сталях содержание углерода ограничивается 0,01 % для обеспечения формирования интерметаллидных включений, подобно классическим мартенситно-стареющим сталям. Кроме того, эти TRIP-стали содержат 9–15 % Mn, 1–3 % Mo и 1–2 % Ni [10, 31].

Термическая обработка мартенситно-стареющих TRIP-сталей на первом этапе предполагает получение однородной аустенитной структуры (нагревом до 1 100 °C) с последую-

щей закалкой. Второй этап заключается в старении мартенсита при 450–600 °C. Во время старения происходит выделение интерметаллидных фаз, а также «реверсия» мартенсита в аустенит: за счет перераспределения углерода и марганца на границе раздела «мартенсит/аустенит» происходит образование и рост новых аустенитных зерен [31]. По завершении термической обработки микроструктура стали имеет упрочненный наноразмерными частицами мартенсит и ≈ 15 % остаточного аустенита [10]. Такая микроструктура обеспечивает в стали предел прочности на уровне 1 500 МПа при общем удлинении 15–20 % [31, 32]. Несмотря на комбинацию TRIP-эффекта и старения мартенсита, а также использование существенно более дорогого легирования, данная концепция ощутимо проигрывает по комплексу механических свойств Q&P-сталям и сталям с нанобейнитом [17, 24]. Тем не менее, она легче реализуется в промышленных условиях при обработке широкого спектра изделий, следовательно, может найти промышленное применение в будущем.

Химический состав TRIP-сталей и соответствующие механические свойства приведены в табл. 1, из которой следует, что низколегированные TRIP-assisted стали характеризуются хорошим соотношением «стоимость/комплекс свойств», что делает их перспективными для промышленного использования в автомобилестроении и машиностроительной отрасли промышленности. Направления дальнейшего исследования этих сталей лежат в области адаптации TRIP-сталей к условиям реального металлургического производства и к специфическим условиям эксплуатации различных металлоизделий.

Научная новизна и практическая значимость

В работе произведен анализ публикаций, посвященных исследованию современных конструкционных сталей, реализующих TRIP-эффект. Показано, что ключевую роль в обеспечении высокого комплекса свойств в TRIP-сталях играет формирование многофазной структуры с повышенной долей остаточного аустенита, склонного к деформационному мартенситному превращению.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства современных сталей, использующих TRIP-эффект

Table 1

Chemical composition and mechanical properties of modern steels using the TRIP effect

Стали	Источник	Содержание легирующих элементов								$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
		C	Si	Al	Mn	Cu	Ni	Mo	V/ Ti			
Низколегированные TRIP-assisted	[34]	0,20	1,50	–	1,8	–	–	–	–	988	–	21,5
	[25]	0,27	1,38	–	1,88	–	–	–	–	860	–	38,0
δ -TRIP	[12]	0,36	0,73	2,22	1,96	0,52	–	–	–	1000	–	27
	[37]	0,39	0,21	3,84	0,51	–	–	–	–	661	–	41
Maraging-TRIP	[32]	0,01	0,06	0,11	11,9	–	2,06	1,12	1,09 Ti	1300	–	21,0

Выводы

1. Современные TRIP-assisted стали принадлежат к группе высокопрочных сталей AHSS (Advanced High-Strength Steel) первого поколения, которые обеспечивают повышенный комплекс механических и технологических свойств (штампуемость, свариваемость) при относительно невысоком уровне легирования.

2. После проведения термической обработки TRIP-assisted стали имеют многофазную структуру, состоящую из феррита, бескарбидного бейнита, мартенсита и 5–20 % метастабильного

остаточного аустенита, склонного к деформационному мартенситному превращению. Реализация TRIP-эффекта сопровождается ростом прочности и пластичности стали.

3. Ввиду своей технологичности концепция получения δ -TRIP-сталей, обладающих повышенным комплексом механических свойств в литом состоянии, является перспективной для широкого промышленного применения.

Статья подготовлена в рамках проекта 0120U102087, финансируемого Министерством образования и науки Украины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Богачев И. Н., Минц Р. И. *Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов*. Москва : Машгиз, 1959. 110 с.
2. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. *Специальные стали*. Москва : МИСИС, 1999. 408 с.
3. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. *Превращения в железе и стали*. Москва : Наука, 1977. 238 с.
4. Малинов Л. С., Малинов В. Л. Повышение износостойкости сталей и чугунов за счет получения в их структуре метастабильного аустенита и реализации эффекта самозакалки при нагружении. *Металл и литье Украины*. 2001. № 1–2. С. 8–12.
5. Малинов Л. С., Малинов В. Л. *Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии* : монография. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2007. 346 с.
6. Чейлях А. П. *Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии* : монография. Мариуполь : ПГТУ, 2009. 483 с.
7. Bhadeshia H. K. D. H., Edmonds D. V. The bainite transformation in a silicon steel. *Metall Trans A*. 1979. Vol. 10. Iss. 7. A. P. 895–907. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02658309>
8. Bhadeshia H. K. D. H. TRIP-assisted steels? *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. Iss. 9. P. 1059–1060. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1059>
9. Bhattacharyya T., Singh S. B., Das S., Haldar A., Bhattacharjee D. Development and characterisation of C–Mn–Al–Si–Nb TRIP aided steel. *Materials Science and Engineering : A*. 2011. Vol. 528. Iss. 6. P. 2394–2400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.054>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

10. Bleck W., Guo X., Ma Y. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International*. 2017. Vol. 88. Iss. 10. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201700218>
11. Caballero F. G., Miller M. K., Babu S. S., Garcia-Mateo C. Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel. *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. Iss. 1. P. 381–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033>
12. Chatterjee S., Muruganath M., Bhadeshia H. K. D. H. δ TRIP steel. *Materials Science and Technology*. 2007. Vol. 23. Iss. 7. P. 819–827. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328407X179746>
13. De Cooman B. C. Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. Vol. 8. Iss. 3–4. P. 285–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.10.002>
14. Efremenko V. G., Zurnadzi V. I., Chabak Y. G., Tsvetkova O. V., Dzherenova A. V. Application of the Q-n-P-Treatment for Increasing the Wear Resistance of Low-Alloy Steel with 0.75% C. *Material Science*. 2017. Vol. 53. Iss. 1. P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0045-3>
15. Fonstein N. *Advanced high strength sheet steels : physical metallurgy, design, processing, and properties*. Berlin : Springer, 2015. 396 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2>
16. Garcia-Mateo C., Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H. Acceleration of Low-temperature Bainite. *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. Iss. 11. P. 1821–1825. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1821>
17. Garcia-Mateo C., Caballero F. G., Sourmail T., Kuntz M., Cornide J., Smanio V., Elvira R. Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3wt% silicon. *Materials Science and Engineering : A*. 2012. Vol. 549. P. 185–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.031>
18. Hashimoto S., Ikeda S., Sugimoto K. I., Miyake S. Effects of Nb and Mo Addition to 0.2%C-1.5%Si-1.5%Mn Steel on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP-aided Steel Sheets. *ISIJ International*. 2004. Vol. 44. Iss. 9. P. 1590–1598. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1590>
19. Jacques P., Delannay F., Cornet X., Harlet P., Ladiere J. Enhancement of the mechanical properties of a low-carbon, low-silicon steel by formation of a multiphased microstructure containing retained austenite. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1998. Vol. 29. Iss. 9. P. 2383–2393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0114-1>
20. Jacques P. J., Girault E., Mertens A., Verlinden B., Humbeek J. V., Delannay F. The developments of cold rolled TRIP-assisted multiphase steels Al-alloyed TRIP-assisted multi-phase steels. *ISIJ International*. 2001. Vol. 41. Iss. 9. P. 1068–1074. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1068>
21. Jacques P. J. Transformation-induced plasticity for high strength formable steels. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. Vol. 8. Iss. 3–4. P. 259–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.006>
22. Kim S. J., Lee C. G., Choi I., Lee S. Effects of heat treatment and alloying elements on the microstructure and mechanical properties of 0.15 wt pct C transformation-induced plasticity-aided cold rolled steel sheet. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32. Iss. 3. P. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0067-0>
23. Koval' A. D., Efremenko V. G., Brykov M. N., Andrushchenko M. I., Kulikovskii R. A., Efremenko A. V. Principles for developing grinding media with increased wear resistance. Part 1. Abrasive wear resistance of iron-based alloys. *Journal of Friction and Wear*. 2012. Vol. 33. Iss. 1. P. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366612010072>
24. Kučerová L., Jirkova H., Mašek B. The effect of alloying on mechanical properties of advanced high strength steels. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. Vol. 59. Iss. 3. P. 1189–1192. DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0206>
25. Lee K. Y. Tensile properties of different chemical compositions for TRIP-assisted multiphase steel for automobile structures. *International Journal of Automotive Technology*. 2008. Vol. 9. Iss. 1. P. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0011-z>
26. Mahieu J., Claessens S., De Cooman B. C. Galvanizability of highstrength steels for automotive applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32. Iss. 11. P. 2905–2907. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-1042-5>
27. Mahieu J., De Cooman B. C., Maki J. Phase transformation and mechanical properties of Si-free CMnAl transformation-induced plasticity-aided steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002. Vol. 33. Iss. 8. P. 2537–2580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0378-9>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

28. Maki J., Mahieu J., De Cooman B. C., Claessens S. Galvanisability of silicon free CMnAl TRIP steels. *Materials science and technology*. 2003. Vol. 19. Iss. 1. P. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708303225009300>
29. Matsumura O., Sakuma Y., Takechi H. Trip and its kinetic aspects in austempered 0.4 C-1.5 Si-0.8 Mn steel. *Scripta Metallurgica*. 1987. Vol. 21. Iss. 10. P. 1301–1306. DOI: [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(87\)90103-7](https://doi.org/10.1016/0036-9748(87)90103-7)
30. Mintz B. Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels. *International Materials Reviews*. 2001. Vol. 46. Iss. 4. P. 169–197. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066001771048754>
31. Raabe D., Ponge D., Dmitrieva O., Sander B. Designing ultrahigh strength steels with good ductility by combining transformation induced plasticity and martensite aging. *Advanced Engineering Materials*. 2009. Vol. 11. Iss. 7. P. 547–555. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.200900061>
32. Raabe D., Ponge D., Dmitrieva O., Sander B. Nanoprecipitate-hardened 1.5 GPa steels with unexpected high ductility. *Scripta Materialia*. 2009. Vol. 60. Iss. 12. P. 1141–1144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.062>
33. Sugimoto K. I., Usui N., Kobayashi M., Hashimoto S. I. Effects of volume fraction and stability of retained austenite on ductility of TRIP-aided dual-phase steels. *ISIJ International*. 1992. Vol. 32. Iss. 12. P. 1311–1318. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.1311>
34. Xu D., Li J., Meng Q., Liu Y., Li P. Effect of heating rate on microstructure and mechanical properties of TRIP-aided multiphase steel. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 614. P. 94–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.075>
35. Yi H. L., Chen P., Hou Z. Y., Hong N., Cai H. L., Xu Y. B., Wu D., Wang G. D. A novel design: partitioning achieved by quenching and tempering (Q-T&P) in an aluminium-added low-density steel. *Scripta Materialia*. 2013. Vol. 68. Iss. 6. P. 370–374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.10.018>
36. Yi H. L., Ghosh S. K., Liu W. J., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H. Non-equilibrium solidification and ferrite in δ -TRIP steel. *Materials Science and Technology*. 2010. Vol. 26. Iss. 7. P. 817–823. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328409X428918>
37. Yi H. L., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H. Extraordinary ductility in Al-bearing δ -TRIP steel. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2011. Vol. 467. Iss. 2125. P. 234–243. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0127>
38. Yi H. L., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H. Stabilisation of ferrite in hot rolled δ -TRIP steel. *Materials Science and Technology*. 2011. Vol. 27. Iss. 2. P. 525–529. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708309X12506934374001>
39. Zhang Z., Manabe K., Li Y., Zhu F. X. Effect of isothermal bainite treatment on microstructure and mechanical properties of low-carbon TRIP seamless steel tube. *Steel Research International*. 2012. Vol. 83. Iss. 7. P. 645–652. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200012>

В. І. ЗУРНАДЖИ^{1*}, В. С. ВОЛОШИН^{2*}, Р. О. КУССА^{3*}, В. Г. ЄФРЕМЕНКО^{4*},
А. В. ДЖЕРЕНОВА^{5*}, О. В. ЦВЕТКОВА^{6*}

^{1*}Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта vadim.zurnadzy@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

^{2*}Каф. «Охорона праці й навколишнього середовища», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 65 55, ел. пошта rector@pstu.edu, ORCID 0000-0002-9922-5618

^{3*}ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», вул. Лепорського, 2, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта kussaroman1@gmail.com, ORCID 0000-0001-9003-2003

^{4*}Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

^{5*}Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта dzherenovs.all@gmail.com, ORCID 0000-0002-4249-4147

^{6*}Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта tsvetkova.elena.0957@gmail.com, ORCID 0000-0001-5216-6641

СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ ІЗ TRIP-ЕФЕКТОМ

Мета. Основною метою цієї роботи є виконання на основі останніх літературних даних аналізу сучасного стану питання про напрями в розробці хімічного складу й режимів термічної обробки сталей, що реалізують TRIP-ефект під час навантаження. Завдяки протіканню деформаційного мартенситного перетворення залишкового аустеніту ці сталі мають підвищений комплекс механічних та експлуатаційних властивостей за умови досить економного легування. **Методика.** У роботі використані відомості, отримані з опублікованої за тривалий період часу наукової літератури, включаючи вітчизняні джерела та високореєтингові зарубіжні видання. Відомості систематизовано за основними типами TRIP-сталей і стосуються їх хімічного складу й технології термічної обробки. **Результати.** Подано історію розвитку досліджень із розробки конструкційних сталей, що використовують TRIP-ефект, а саме: високолегованих однофазних метастабільних аустенітних сталей, а також низьколегованих багатофазних TRIP-assisted сталей, у яких TRIP-ефект відіграє допоміжну роль як додатковий механізм зміцнення та забезпечення підвищеної пластичності. До останньої групи сталей належать: низьколеговані TRIP-assisted сталі, δ -TRIP-сталі та мартенситностаріючі TRIP-сталі. Описано типові схеми легування і схеми термічної обробки, що дозволяють досягти в сталях оптимального співвідношення фазово-структурних складових, кількості і ступеня стабільності залишкового аустеніту до деформаційного мартенситного перетворення і, як результат, – забезпечити підвищений комплекс механічних та експлуатаційних властивостей. Відзначено ключову роль формування безкарбідної структури, що досягається легуванням кремнієм та/або алюмінієм, у забезпеченні високих властивостей сталі. Показано перспективність застосування сучасних конструкційних сталей, що реалізують TRIP-ефект, в автомобілебудуванні та в машинобудівній галузі. Подано рекомендації щодо подальших напрямів досліджень у цій галузі. **Наукова новизна.** У статті проведено аналіз і систематизацію актуальних літературних даних про напрями в розробленні технологій отримання багатофазних конструкційних сталей із залишковим метастабільним аустенітом, що реалізують TRIP-ефект під час навантаження. **Практична значимість.** Результати, отримані в рамках цієї роботи, можуть бути використані як довідкові матеріали в разі розв'язання конструкторських задач, а також в освітніх цілях під час підготовки профільних фахівців з інженерних спеціальностей.

Ключові слова: високоміцні сталі; метастабільний аустеніт; TRIP-ефект; термообробка

V. I. ZURNADZHY^{1*}, V. S. VOLOSHYN^{2*}, R. A. KUSSA^{3*}, V. G. EFREMENKO^{4*},
A. V. DZHERENOVA^{5*}, O. V. TSVETKOVA^{6*}

^{1*}Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail vadim.zurnadzhy@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

^{2*}Dep. «Labor and Environmental Protection», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 65 55, e-mail rector@pstu.edu, ORCID 0000-0002-9922-5618

^{3*}PJSC «Azovstal Iron & Steel Works», Leporskyi St., 1, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, ORCID 0000-0001-9003-2003

^{4*}Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

^{5*}Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail dzherenovs.all@gmail.com, ORCID 0000-0002-4249-4147

^{6*}Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail tsvetkova.elena.0957@gmail.com, ORCID 0000-0001-5216-6641

MODERN STRUCTURAL STEELS WITH TRIP-EFFECT

Purpose. The aim of this work is to analyze the latest literature data on current state of the issue in the development of the chemical composition and heat treatment modes of steels that implement the TRIP effect under loading. Due to the deformation martensitic transformation of retained austenite, these steels have increased mechanical and operational properties with cost-saving alloying. **Methodology.** The information published over a long period of time in scientific literature, including domestic sources and high-rating foreign publications are used in this work. The information is systematized by the main TRIP-steels' types and relates to their chemical composition and heat treatment technology. **Findings.** The article presents a retrospective of the research progress on the development of structural TRIP effect added steels namely: high-alloy single-phase metastable austenitic steels, as well as low-alloy multiphase TRIP-assisted steels, in which the TRIP effect plays an supporting role, as an additional strengthening

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

and providing increased plasticity mechanism. The latter group of steels includes low alloy TRIP-assisted steels, δ -TRIP steels and maraging TRIP steels. The typical alloying schemes and applied heat treatment modes that make it possible to achieve the optimal phase-structural components ratio, the volume fraction and stability of retained austenite to deformation martensitic transformation in steels and, as a result, to provide an increased mechanical and operational properties were described. The key role of the carbide-free structure formation is noted, which is achieved by alloying with silicon and/or aluminum in providing high properties of steel. The prospects of using modern structural TRIP steels in the automotive and in the machine-building industry are shown. Recommendations for further research directions in this area are made. **Originality.** The article provides an analysis and systematization of relevant literature data on the development of technologies for the production of multiphase structural steels with retained metastable austenite, realizing the TRIP effect. **Practical value.** The results of the research can be used as reference materials in solving material design problems, as well as for educational purposes in the preparation of specialized professionals in engineering specialties.

Keywords: high-strength steels; metastable austenite; TRIP effect; heat treatment

REFERENCES

1. Bogachev, I. N., & Mints, R. I. (1959). *Kavitatsionnoe razrushenie zhelezouglerodistykh splavov*. Moscow: Mashgiz. (in Russian)
2. Goldshteyn, M. I., Grachev, S. V., & Veksler, Yu. G. (1999). *Spetsialnye stali*. Moscow: MISIS. (in Russian)
3. Kurdyumov, G. V., Utevskiy, L. M., & Entin, R. I. (1977). *Prevrashcheniya v zheleze i stali*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Malinov, L. S., & Malinov, V. L. Povyshenie iznosostoykosti staley i chugunov za schet polucheniya v ikh strukture metastabilnogo austenita i realizatsii efekta samozakalki pri nagruzhennii. *Metal and casting of Ukraine, 1-2*, 8-12. (in Russian)
5. Malinov, L. S., & Malinov, V. L. (2007). *Ekonomnolegirovannye splavy s martensitnymi prevrashcheniyami i uprochnyayushchie tekhnologii: monografiya*. Kharkiv : NNTs KhFTI. (in Russian)
6. Cheylyakh, A. P. (2009). *Ekonomnolegirovannye metastabilnye splavy i uprochnyayushchie tekhnologii: monografiya*. Mariupol: PGTU PGTU. (in Russian)
7. Bhadeshia, H. D. H., & Edmonds, D. V. (1979). The bainite transformation in a silicon steel. *Metallurgical Transactions A*, 10(7), 895-907. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02658309> (in English)
8. Bhadeshia, H. K. (2002). TRIP-assisted steels? *ISIJ international*, 42(9), 1059-1060. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1059> (in English)
9. Bhattacharyya, T., Singh, S. B., Das, S., Haldar, A., & Bhattacharjee, D. (2011). Development and characterisation of C–Mn–Al–Si–Nb TRIP aided steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2394-2400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.054> (in English)
10. Bleck, W., Guo, X., & Ma, Y. (2017). The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International*, 88(10), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201700218> (in English)
11. Caballero, F. G., Miller, M. K., Babu, S. S., & Garcia-Mateo, C. (2007). Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel. *Acta Materialia*, 55(1), 381-390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033> (in English)
12. Chatterjee, S., Muruganath, M., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2007). δ TRIP steel. *Materials Science and Technology*, 23(7), 819-827. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328407X179746> (in English)
13. De Cooman, B. C. (2004). Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(3-4), 285-303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.10.002> (in English)
14. Efremenko, V. G., Zurnadzhi, V. I., Chabak, Y. G., Tsvetkova, O. V., & Dzherenova, A. V. (2017). Application of the QnP-treatment for increasing the wear resistance of low-alloy steel with 0.75% C. *Materials Science*, 53(1), 67-75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0045-3> (in English)
15. Fonstein, N. (2015). *Advanced high strength sheet steels*. Berlin: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2> (in English)
16. Garcia-Mateo, C., Caballero, F. G., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2003). Acceleration of Low-temperature Bainite. *ISIJ international*, 43(11), 1821-1825. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1821> (in English)
17. Garcia-Mateo, C., Caballero, F. G., Sourmail, T., Kuntz, M., Cornide, J., Smanio, V., & Elvira, R. (2012). Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3wt% silicon. *Materials Science and Engineering: A*, 549, 185-192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.031> (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

18. Hashimoto, S., Ikeda, S., Sugimoto, K. I., & Miyake, S. (2004). Effects of Nb and Mo Addition to 0.2% C-1.5% Si-1.5% Mn Steel on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP-aided Steel Sheets. *ISIJ International*, 44(9), 1590-1598. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1590> (in English)
19. Jacques, P., Delannay, F., Cornet, X., Harlet, P., & Ladriere, J. (1998). Enhancement of the mechanical properties of a low-carbon, low-silicon steel by formation of a multiphased microstructure containing retained austenite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(9), 2383-2393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0114-1> (in English)
20. Jacques, P. J., Girault, E., Mertens, A., Verlinden, B., Humbeeck, J. V., & Delannay, F. (2001). The developments of cold-rolled TRIP-assisted multiphase steels. Al-alloyed TRIP-assisted multiphase steels. *ISIJ international*, 41(9), 1068-1074. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1068> (in English)
21. Jacques, P. J. (2004). Transformation-induced plasticity for high strength formable steels. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(3-4), 259-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.006> (in English)
22. Kim, S. J., Lee, C. G., Choi, I., & Lee, S. (2001). Effects of heat treatment and alloying elements on the microstructures and mechanical properties of 0.15 wt pct C transformation-induced plasticity-aided cold-rolled steel sheets. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(3), 505-514. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0067-0> (in English)
23. Koval', A. D., Efremenko, V. G., Brykov, M. N., Andrushchenko, M. I., Kulikovskii, R. A., & Efremenko, A. V. (2012). Principles for developing grinding media with increased wear resistance. Part 1. Abrasive wear resistance of iron-based alloys. *Journal of Friction and Wear*, 33(1), 39-46. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366612010072> (in English)
24. Kučerová, L., Jirkova, H., & Mašek, B. (2014). The effect of alloying on mechanical properties of advanced high strength steels. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(3), 1189-1192. DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0206> (in English)
25. Lee, K. Y. (2008). Tensile properties of different chemical compositions for TRIP-assisted multiphase steel for automobile structures. *International Journal of Automotive Technology*, 9(1), 87-93. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0011-z> (in English)
26. Mahieu, J., Claessens, S., & De Cooman, B. C. (2001). Galvanizability of high-strength steels for automotive applications. *Metallurgical and Materials Transactions*, 32(11), 2905-2907. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-1042-5> (in English)
27. Mahieu, J., De Cooman, B. C., & Maki, J. (2002). Phase transformation and mechanical properties of Si-free CMnAl transformation-induced plasticity-aided steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(8), 2573-2580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0378-9> (in English)
28. Maki, J., Mahieu, J., De Cooman, B. C., & Claessens, S. (2003). Galvanisability of silicon free CMnAl TRIP steels. *Materials science and technology*, 19(1), 125-131. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708303225009300> (in English)
29. Matsumura, O., Sakuma, Y., & Takechi, H. (1987). Trip and its kinetic aspects in austempered 0.4 C-1.5 Si-0.8 Mn steel. *Scripta Metallurgica*, 21(10), 1301-1306. DOI: [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(87\)90103-7](https://doi.org/10.1016/0036-9748(87)90103-7) (in English)
30. Mintz, B. (2001). Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels. *International Materials Reviews*, 46(4), 169-197. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066001771048754> (in English)
31. Raabe, D., Ponge, D., Dmitrieva, O., & Sander, B. (2009). Designing ultrahigh strength steels with good ductility by combining transformation induced plasticity and martensite aging. *Advanced Engineering Materials*, 11(7), 547-555. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.200900061> (in English)
32. Raabe, D., Ponge, D., Dmitrieva, O., & Sander, B. (2009). Nanoprecipitate-hardened 1.5 GPa steels with unexpected high ductility. *Scripta Materialia*, 60(12), 1141-1144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.062> (in English)
33. Sugimoto, K. I., Usui, N., Kobayashi, M., & Hashimoto, S. I. (1992). Effects of volume fraction and stability of retained austenite on ductility of TRIP-aided dual-phase steels. *ISIJ International*, 32(12), 1311-1318. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.1311> (in English)
34. Xu, D., Li, J., Meng, Q., Liu, Y., & Li, P. (2014). Effect of heating rate on microstructure and mechanical properties of TRIP-aided multiphase steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 614, 94-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.075> (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

35. Yi, H. L., Chen, P., Hou, Z. Y., Hong, N., Cai, H. L., Xu, Y. B., Wang, G. D. (2013). A novel design: partitioning achieved by quenching and tempering (Q–T & P) in an aluminium-added low-density steel. *Scripta Materialia*, 68(6), 370-374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.10.018> (in English)
36. Yi, H. L., Ghosh, S. K., Liu, W. J., Lee, K. Y., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2010). Non-equilibrium solidification and ferrite in δ -TRIP steel. *Materials Science and Technology*, 26(7), 817-823. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328409X428918> (in English)
37. Yi, H. L., Lee, K. Y., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2011). Extraordinary ductility in Al-bearing δ -TRIP steel. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467(2125), 234-243. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0127> (in English)
38. Yi, H. L., Lee, K. Y., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2011). Stabilisation of ferrite in hot rolled δ -TRIP steel. *Materials Science and Technology*, 27(2), 525-529. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708309X12506934374001> (in English)
39. Zhang, Z., Manabe, K. I., Li, Y., & Zhu, F. (2012). Effect of Isothermal Bainite Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon TRIP Seamless Steel Tube. *Steel Research International*, 83(7), 645-652. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200012> (in English)

Поступила в редколлегию: 01.06.2020

Принята к печати: 30.09.2020