







## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)





### Структурные преобразования углеродистых ферритно-перлитных сталей в условиях высокоскоростного нагружения

Анатолий Батаев<sup>a</sup>, Иван Батаев<sup>b</sup>, Аэлита Никулина<sup>c, \*</sup>, Альберт Попелюх<sup>d</sup>,  
Игорь Балаганский<sup>e</sup>, Наталья Плотникова<sup>f</sup>

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6227-5398>,  [bataev@adm.nstu.ru](mailto:bataev@adm.nstu.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>,  [i.bataev@corp.nstu.ru](mailto:i.bataev@corp.nstu.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9249-2273>,  [a.nikulina@corp.nstu.ru](mailto:a.nikulina@corp.nstu.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0965-3206>,  [popelyux@corp.nstu.ru](mailto:popelyux@corp.nstu.ru),

<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7708-579X>,  [balaganskij@corp.nstu.ru](mailto:balaganskij@corp.nstu.ru), <sup>f</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8005-1128>,  [n.plotnikova@corp.nstu.ru](mailto:n.plotnikova@corp.nstu.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 538.91

#### История статьи:

Поступила: 21 июня 2019

Рецензирование: 22 июля 2019

Принята к печати: 15 августа 2019

Доступно онлайн: 15 сентября 2019

#### Ключевые слова:

Дозвектоидные стали

Деформация взрывом

Деформационное двойникование

#### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17–72–10226)

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** С использованием методов световой, растровой и просвечивающей электронной микроскопии исследовано строение сталей с ферритно-перлитной структурой, подвергнутых взрывному нагружению. **Методы исследования.** Для испытаний использовали стальные образцы различной формы и химического состава. Материалами исследования являлись отожженные стали 20, 60, У7А. Динамическое нагружение заготовок осуществляли с использованием схем деформации плоских пластин (дисков) с применением явления фокусировки энергии и деформации труб. Для проведения структурных исследований использовали световой микроскоп Carl Zeiss Axio Observer Z1m, растровый электронный микроскоп EVO 50 XVP и трансмиссионный электронный микроскоп FEI Tecnai G2 20 TWIN. **Результаты и обсуждение.** Особенностью, характерной для начального этапа деформации исследуемых материалов, является процесс двойникования, происходящий как в ферритных зернах, так и в колониях пластинчатого перлита. Анализ данных, полученных на просвечивающем электронном микроскопе, свидетельствует о том, что ширина двойников сильно варьируется. Встречаются как тонкие двойники с шириной порядка 10...15 нм, так и достаточно широкие, толщина которых составляет до 100 нм. Такой диапазон наблюдается как в ферритных зернах, так и перлитных колониях. В пределах отдельной колонии двойники деформационного происхождения могут быть представлены как совокупность множества микродвойников, разделенных между собой цементитными пластинами. Зафиксированы случаи сквозного продвижения двойника через зерна феррита и смежные с ними колонии перлита, что свидетельствует о единстве ферритной матрицы в этих структурных составляющих. Нагрев стальных заготовок и повышение плотности двойников являются факторами, затрудняющими процесс двойникования и инициирующими механизм деформации скольжением. Смена механизма деформации сопровождается искривлением, а в некоторых участках полной деградацией двойников, возникших на начальном этапе нагружения заготовок.

**Для цитирования:** Структурные преобразования углеродистых ферритно-перлитных сталей в условиях высокоскоростного нагружения / А.А. Батаев, И.А. Батаев, А.А. Никулина, А.И. Попелюх, И.А. Балаганский, Н.В. Плотникова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 115–128. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-115-128.

### Введение

Углеродистые стали, являющиеся наиболее распространенными промышленными материалами, длительное время исследуются на различных масштабных уровнях с использованием широкого спектра аналитических методов. Боль-

шой интерес вызывают экспериментальные данные, характеризующие поведение структурных составляющих в различных условиях внешнего нагружения. Особенности пластического течения определяют прочностные свойства материалов, их технологические свойства и склонность к разрушению.

Результаты многочисленных исследований, выполненных отечественными и зарубежными специалистами, позволяют сделать вывод, что наиболее важные особенности поведения основных структурных составляющих углеро-

#### \*Адрес для переписки

Никулина Аэлита Александровна, к.т.н., доцент

Новосибирский государственный технический университет,

пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия,

Тел. +7 (383) 346-11-71, e-mail: [a.nikulina@corp.nstu.ru](mailto:a.nikulina@corp.nstu.ru)

дистых сталей, к которым относятся феррит и перлит, уже подробно изучены [1–10]. В наибольшей степени это утверждение относится к ферриту, который во многих исследованиях выполнял функцию модельного материала с ОЦК-структурой, позволяющую на дислокационном уровне выявлять особенности структурных преобразований, обусловленных каким-либо внешним воздействием. Перлит в отличие от феррита имеет более сложное двухфазное строение. Этим обстоятельством объясняется тот факт, что количество структурных исследований перлита существенно меньше по сравнению с ферритом. Тем не менее и этой структурной составляющей посвящены монографии [11, 12], а также достаточно много статей, например [13–26]. Анализ работ, объектами которых являлись деформированные стали со структурой перлита, свидетельствует о том, что большинство из них связано с реализацией способов однократного статического нагружения. Подробно изучены процессы, происходящие в феррите при усталостном нагружении сталей. К перлиту это относится в меньшей степени [27].

Гораздо менее изученными являются структурные преобразования, происходящие в условиях высокоскоростного нагружения в феррите, а тем более в перлите [28–31]. Речь идет о скоростях деформации, характерных для взрывного нагружения заготовок. Можно выделить три обстоятельства, объясняющих относительно малый объем исследований динамически нагруженных сталей со структурой перлита. Во-первых, процессы динамического нагружения, например сварка взрывом, не относятся к массовым способам обработки материалов. Во-вторых, явления интенсивной пластической деформации, представляющие наибольший интерес, при динамическом нагружении загото-

вок, как правило, предельно локализованы, что существенно затрудняет процесс подготовки объектов исследования. В-третьих, наиболее эффективным методом исследований динамически деформированных материалов является трансмиссионная электронная микроскопия, представляющая собой весьма трудоемкий процесс.

Следует подчеркнуть, что большинство исследований процессов динамического нагружения сталей и сплавов было выполнено около 30–60 лет назад [29, 32–34]. Методы структурных исследований, использовавшиеся при этом, в частности электронная микроскопия, были менее совершенными по сравнению с современными. Главным образом по этой причине некоторые особенности поведения динамически нагруженных материалов остались до конца не изученными.

Цель настоящей работы заключалась в изучении структурных преобразований, происходящих в феррите и перлите в условиях взрывного нагружения углеродистых сталей.

### Методика исследований

Для испытаний использовали стальные образцы различной формы и химического состава. Материалами исследования являлись отожденные стали 20, 60, У7А, состав которых представлен в табл. 1. Динамическое нагружение заготовок осуществляли с использованием нескольких схем (рис. 1). Технологическая схема, изображенная на рис. 1, а, предусматривала деформацию диска диаметром 120 мм и толщиной 12 мм, изготовленного из горячекатаной стали 20 с ферритно-перлитной структурой. Нагружение стальной заготовки осуществлялось в осевом направлении путем фокусировки энергии во взрывной системе, включающей в свой состав

Таблица 1

Table 1

Элементный состав исследуемых сталей  
The elemental composition of the investigated steels

Марка стали / Steel grade	Содержание элементов, % (масс.) / Element content, wt %					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
20	0,18	0,51	0,16	0,03	0,04	Ост.
60	0,62	0,6	0,22	0,03	0,03	Ост.
У7А	0,72	0,31	0,2	0,02	0,02	Ост.

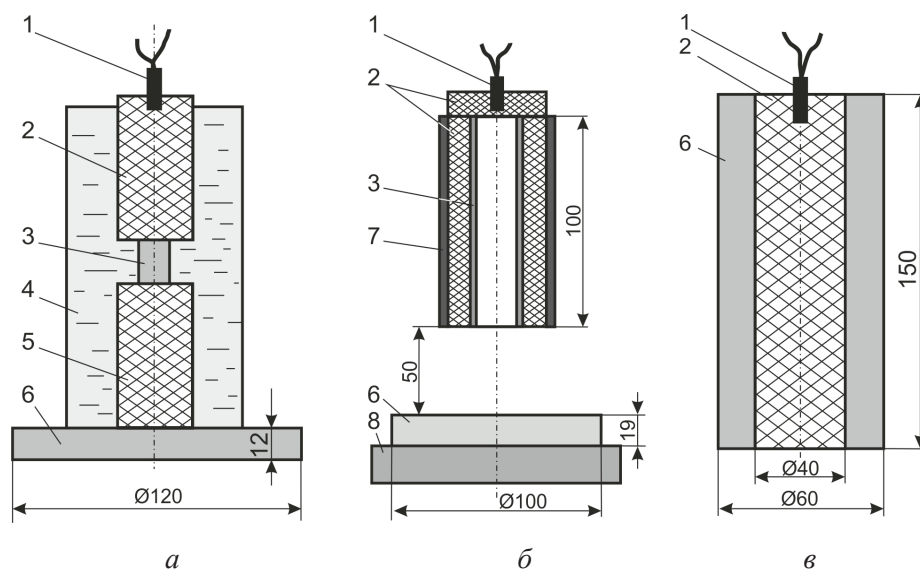


Рис. 1. Схемы взрывного нагружения стальных образцов:

*а, б* – деформация плоских пластин (дисков) с применением явления фокусировки энергии; *в* – деформация трубы; 1 – высоковольтный детонатор; 2 – взрывчатое вещество; 3 – керамическая вставка; 4 – емкость с водой; 5 – пассивный заряд взрывчатого вещества; 6 – стальной образец; 7 – алюминиевая трубка; 8 – основание

Fig. 1. Explosive loading schemes for steel samples:

*а, б* – deformation of flat plates (disks) using the energy focusing phenomenon, *в* – pipe deformation; 1 – high-voltage detonator; 2 – explosive; 3 – ceramic insert; 4 – container with water; 5 – passive explosive charge; 6 – steel sample; 7 – aluminum tube; 8 – base

высокомодульные упругие элементы – цилиндры из карбида кремния [30]. В соответствии со второй схемой (рис. 1, б) образец из стали У7А в виде диска диаметром 100 мм и толщиной 19 мм деформировался продуктами, возникшими при взрывном обжатиі керамической трубки. Схема взрывного нагружения трубчатых образцов из стали 60 с толщиной стенки, равной 10 мм, представлена на рис. 1, в. Деформирование заготовок осуществлялось в процессе детонации размещенных в них зарядов взрывчатого вещества.

Для проведения структурных исследований использовали световой микроскоп Carl Zeiss Axio Observer Z1m, растровый электронный микроскоп EVO 50 XVP и трансмиссионный электронный микроскоп FEI Tecnai G2 20 TWIN. Металлографические шлифы были приготовлены по стандартной методике на шлифовально-полировальной установке Struers LaboPol 5. Для химического выявления структуры применяли трехпроцентный раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Объектами для проведения трансмиссионных электронно-микроскопических исследований являлись металлические

фольги, приготовленные с использованием операций электроискровой резки, механического утонения до толщины 100 мкм и электролитического полирования на установке TenuPol-5. Исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Структура, физические и механические свойства материалов» (ЦКП ССМ НГТУ).

## Результаты и их обсуждение

Анализ результатов структурных исследований материалов, нагруженных динамически в соответствии со схемами, изображенными на рис. 1, свидетельствует о том, что во всех случаях пластическая деформация сопровождается формированием двойников (рис. 2). Дефекты этого типа возникают как в ферритных зернах (рис. 2, а–в), так и в колониях пластинчатого перлита (рис. 2, г). Образование двойников обусловлено затруднением пластической деформации материалов по механизму скольжения. Следует подчеркнуть, что в условиях статического и квазистатического нагружения двойники в феррите



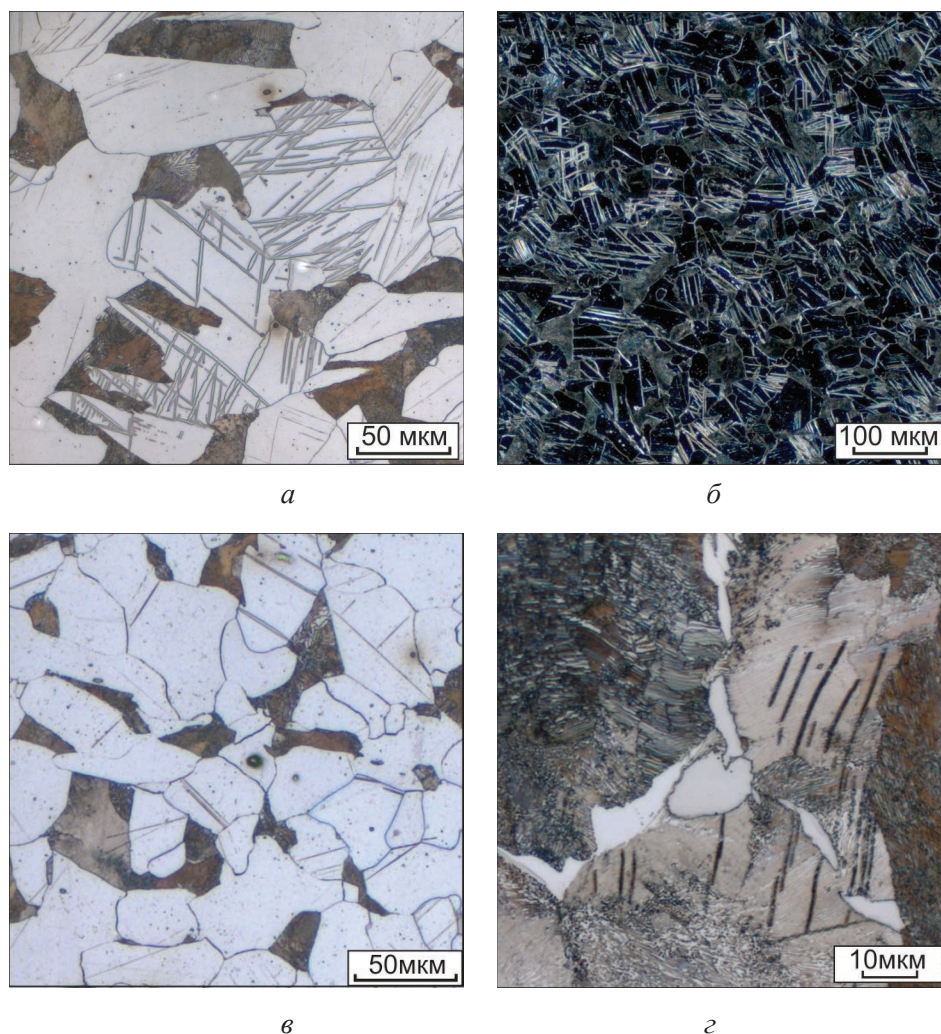


Рис. 2. Двойники деформационного происхождения, сформированные при взрывном нагружении стали 20: вблизи центра образца (*а*, *б*) и при удалении от центра на расстояние 40 мм (*в*); при нагружении стали 60 (*г*). Световая микроскопия:

*а*, *в*, *г* – режим светлого поля; *б* – режим темного поля

Fig. 2. Deformation twins, formed during the explosive loading of steel 20: near the center of the specimen (*a*, *б*) and at a distance of 40 mm from the center (*в*); when loading steel 60 (*г*). Light microscopy:

*а*, *в*, *г* – bright field; *б* – dark field

и перлите не формируются [12, 35]. Технологическими факторами, инициирующими механизм двойникования в высокосимметричных кристаллах, являются низкая температура и высокая скорость деформации, характерные для взрывного нагружения. Согласно выполненным ранее исследованиям в кристаллах с ОЦК-решеткой двойникование происходит по системам  $\{112\} \langle 111 \rangle$  [35].

Количество двойников, возникающих как в ферритных зернах, так и в перлитных колониях, зависит от степени деформации сталей. При реализации схем, соответствующих рис. 1, *а*, *б*,

наиболее нагруженными являются центральные зоны дисковых образцов (рис. 3). Количество двойников деформационного происхождения в них максимально. Изображение на рис. 2, *б* свидетельствует о высокой плотности двойников, возникающих в динамически деформированных ферритных зернах низкоуглеродистой стали 20. В некоторых зернах количество двойников превышает 100. При удалении от центра образца объемная доля двойникового материала снижается. На рис. 2, *в* представлено распределение анализируемых дефектов в слабдеформированной зоне диска из стали 20, расположенной



Рис. 3. Общий вид образца после взрывного нагружения по схеме, изображенной на рис. 1, б

Fig. 3. General view of the sample after explosive loading according to the scheme in fig. 1, б

на расстоянии  $\sim 40$  мм от его центра. Так как образование каждого двойника является актом локализованной пластической деформации, представленное изображение позволяет сделать вывод о степени однородности пластического течения при динамическом нагружении стали с ферритно-перлитной структурой.

Присутствие даже в малых количествах частиц второй фазы является фактором, который в значительной степени снижает склонность сплавов к двойникованию [29]. В пластинчатом перлите объемная доля цементита превышает 10 %. Тем не менее полученные в данном исследовании результаты свидетельствуют о том, что даже при таком высоком содержании частиц второй фазы механизм деформации перлита двойникованием проявляется отчетливо. Следует подчеркнуть, что в литературе особенности пластического течения сплавов, находящихся в гетерофазном состоянии, описаны не так подробно, как гомогенных материалов [11, 18, 21, 36]. Присутствие двух фаз, характеризующихся различным комплексом механических свойств, осложняет процессы пластического течения в зоне двойников, возникающих в колониях пластинчатого перлита. С учетом отмеченных обстоятельств при проведении структурных исследований углеродистых сталей особое внимание уделяли изучению деталей поведения динамически нагруженного пластинчатого перлита.

На фоне колоний пластинчатого перлита двойники отчетливо различимы. Можно выделить несколько признаков, характерных для такого рода дефектов, возникающих в перлите. Во-первых, двойники располагаются внутри перлитных колоний и, будучи связанными кристаллографически с  $\alpha$ -фазой, не пересекают высокоугловые границы ферритной матрицы. Во-вторых, при наличии в одной колонии двух и более двойников одной кристаллографической системы они параллельны друг другу (рис. 4). Нередко встречаются колонии, в пределах которых можно выделить несколько систем параллельных двойников. В-третьих, ширина двойника одинакова по всей его длине. В четвертых, на начальной стадии деформации двойники являются прямолинейными. Наблюдаемое в некоторых колониях искривление двойников является результатом последующей деформации перлитных колоний.

Следует выделить три структурных фактора, способствующих проявлению двойников на металлографических шлифах. Один из них связан с повышенной травимостью феррита в зоне двойникования, которая, в свою очередь, обусловлена ростом механических напряжений в узкой полосе  $\alpha$ -фазы при совместной деформации ферритной матрицы и цементитных пластин. Если процесс двойникования феррита сопровождается разрушением цементитных пластин, химическая травимость феррита возрастает еще в большей степени. Третий фактор, способствующий визуализации двойников, связан с двойным перегибом цементитных пластин, что делает заметным этот дефект на фоне пластинчатой структуры (рис. 4, б).

Анализ данных, полученных на просвечивающем электронном микроскопе, свидетельствует о том, что ширина двойников сильно варьируется. Встречаются как тонкие двойники шириной порядка 10...15 нм, так и достаточно широкие, толщина которых составляет до 100 нм. Такой диапазон наблюдается как в ферритных зернах, так и перлитных колониях.

В пределах отдельной колонии двойники деформационного происхождения могут быть представлены как совокупность множества микродвойников, разделенных между собой цементитными пластинами (рис. 5, а). Темнопольное изображение, свидетельствующее о последовательном



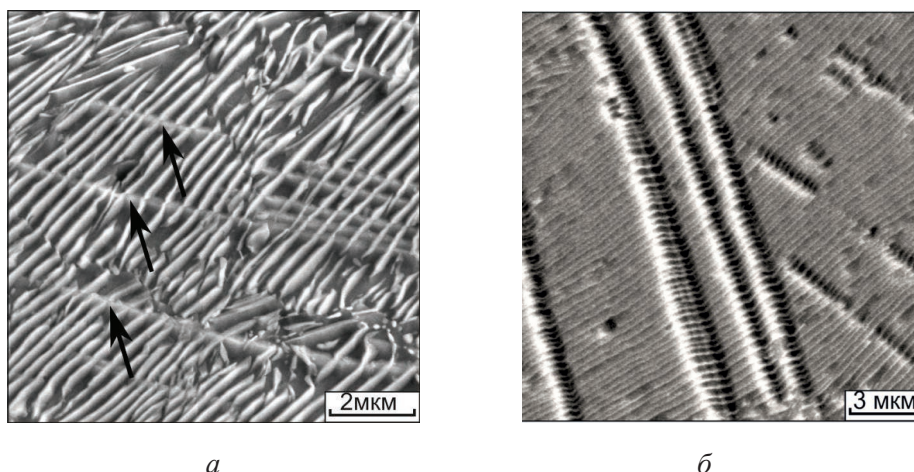


Рис. 4. Системы двойников в колониях пластинчатого перлита стали 60, деформированной взрывом:

*a* – система параллельных двойников (указаны стрелками); *б* – повышенная травимость феррита в области прохождения двойников в перлите

Fig. 4. Systems of twins in the colonies of lamellar perlite of steel 60 deformed by the explosion:

*a* – is a system of parallel twins (indicated by arrows); *б* – increased etching of ferrite in the area of passage of twins in pearlite

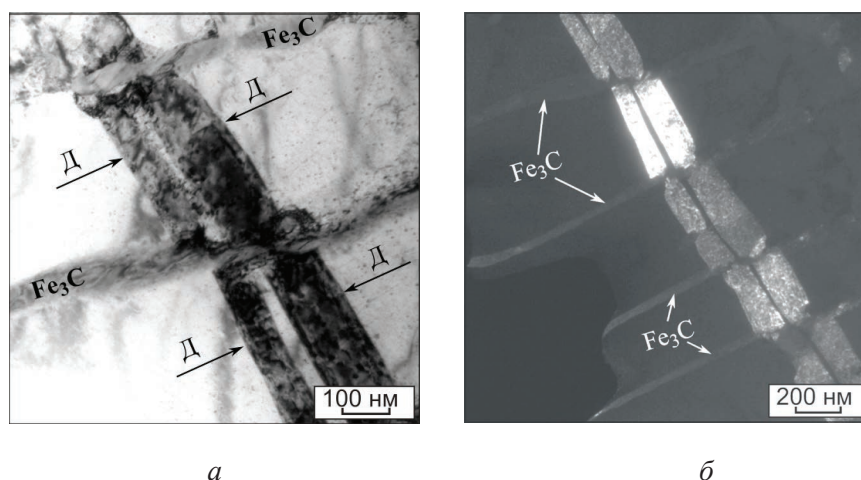


Рис. 5. Микродвойники (Д) в феррите, разделенные цементитными пластинами ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ):

*a* – светлое поле; *б* – темное поле в рефлексе двойника

Fig. 5. Microtwins (D) in ferrite, separated by cementite plates ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ):

*a* – bright field; *б* – dark field in the twin reflex

развороте матрицы  $\alpha$ -фазы в пределах нескольких ферритных промежутков, представлено на рис. 5, б. Указанный снимок позволяет сделать вывод о наличии внутри ферритных прослоек по два микродвойника (светлые блоки), ориентировка кристаллической решетки которых одинакова. Тонкий слой  $\alpha$ -фазы, расположенный

между ними, в процессе деформации двойникованию подвержен не был.

Очевидно, что в пределах единой ферритной матрицы, характерной для колонии пластинчатого перлита, множество микродвойников должно быть выстроено в одну прямую линию. Проведенные измерения (рис. 5, б) показали,

что соседние микродвойники, разделенные цементитными пластинами, разориентированы относительно друг друга на угол  $5...10^\circ$ . Причина зафиксированной экспериментально смены направления двойников может быть объяснена сдвигом материала в направлении, параллельном плоскостям межфазных границ (рис. 6). Искривленная форма двойников свидетельствует о том, что после их образования материал продолжал деформироваться не двойникованием, а по механизму скольжения.

Важной особенностью, характерной для двойников, образующихся в перлите, является то, что структурные преобразования развиваются в узкой полосе, ширина которой соизмерима с толщиной ферритных слоев, входящих в перлитную колонию. Особый интерес представляет поведение цементитных пластин, пересекающих двойник. Разворот ферритной матрицы, являющийся результатом двойникования  $\alpha$ -фазы, вызывает деформацию цементитных пластин и сопровождается формированием в них напряже-

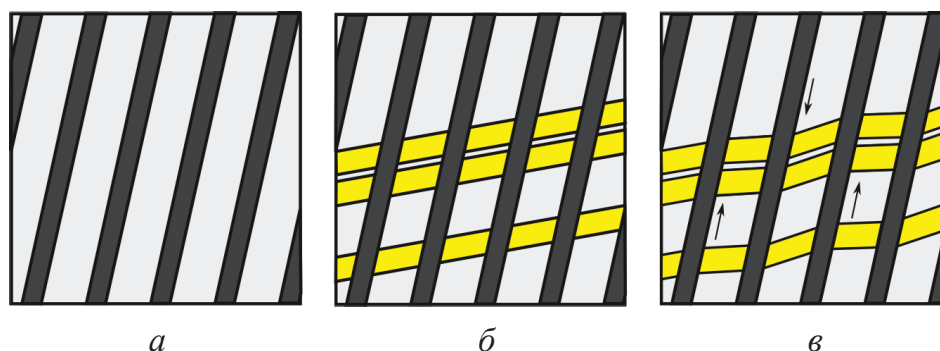


Рис. 6. Схема формирования «ломаных» двойников в колонии пластинчатого перлита:

*a* – исходная колония; *б* – образование прямолинейных двойников; *в* – искажение двойников при воздействии напряжений вдоль межфазных границ

Fig. 6. The formation scheme of “broken” twins in the pearlite colony:

*a* – the original colony; *б* – formation of straight-line twins; *в* – distortion of twins under the effect of stresses along the interphase boundaries

ний. Форма локально изогнутых цементитных пластин свидетельствует о том, что в отличие от феррита цементит деформируется по механизму, отличному от двойникования. Об этом свидетельствует тот факт, что цементитные пластины изгибаются плавно (рис. 4, б и 7). Признаков двойникования в цементите в виде четко выраженных линий ни одним из методов структурных исследований не зафиксировано. Изогнутые в зоне двойникования феррита цементитные пластины могут сохранять сплошность либо разрушаться с образованием микротрещин. Несмотря на то что пластины имеют два перегиба, разрушаются они с образованием одной трещины.

Анализ процессов двойникования, происходящих в деформированных взрывом сталях с ферритно-перлитной структурой, позволил зафиксировать особенность строения этих сталей, связанную с кристаллографической ориентаци-

ей структурно свободного феррита и феррита, входящего в колонии пластинчатого перлита. При выполнении структурных исследований сталей доэвтектоидного состава было замечено, что при сопряжении микрообъемов  $\alpha$ -фазы, которые по внешним очертаниям относятся к зернам феррита и колониям пластинчатого перлита, иногда отсутствуют признаки, свидетельствующие о разориентировке феррита. На основании этого наблюдения можно предположить, что в некоторых зонах матрица полиэдрического феррита и ферритной матрицы в смежных с ним колониях перлита является общей. Если эта гипотеза является верной, то двойники, возникшие в одной структурной составляющей, например в феррите, должны распространяться без изменения траектории в соседней структурной составляющей – в пластинчатом перлите. Результаты структурных исследований подтверждают отмеченную гипотезу. На рис. 8 четко просма-

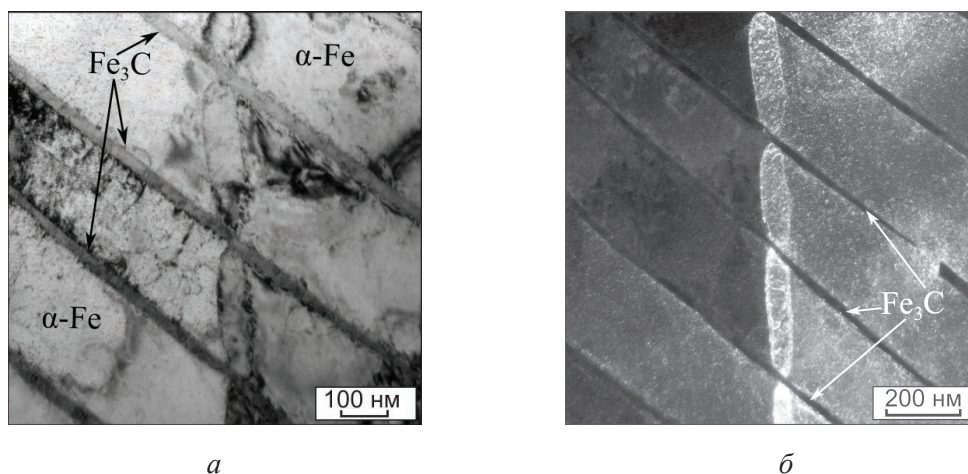


Рис. 7. Деформация цементитных пластин при двойниковании феррита:  
*a* – светопольное изображение; *б* – темнопольное изображение в рефлексе двойника

Fig. 7. Deformation of cementite plates during twinning of ferrite:  
*a* – bright field image; *б* – dark-field image in the twin reflex

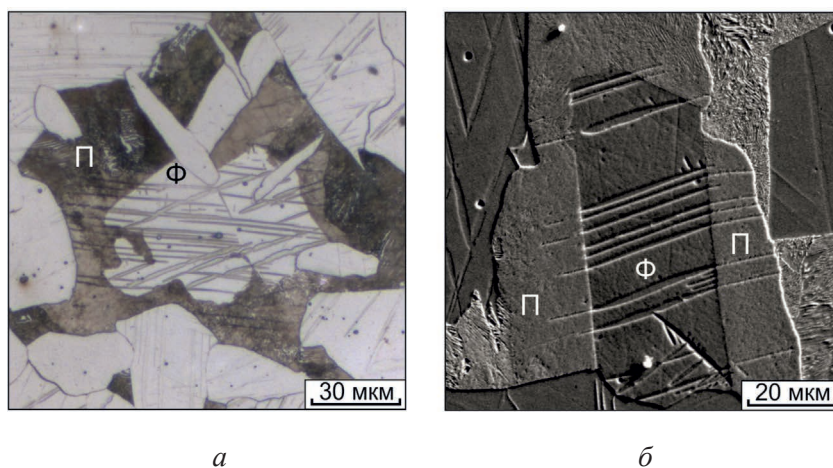


Рис. 8. Распространение двойников деформационного происхождения в ферритных зернах (Ф) и смежных с ними колониях пластинчатого перлита (П) в динамически нагруженных образцах из стали 20:

*a* – световая микроскопия; *б* – растровая электронная микроскопия

Fig. 8. Distribution of deformation twins in ferritic grains (F) and adjacent colonies of lamellar perlite (P) in dynamically loaded samples of steel 20:

*a* – light microscopy; *б* – scanning electron microscopy

триваются дефекты в виде характерных линий – двойников, переходящих из одной структурной составляющей в другую (из феррита в перлит).

Благодаря характерной двухфазной слоистой структуре возникшие в пластинчатом перлите полосы локализованного сдвига в большинстве случаев отчетливо проявляются в пределах отдельных колоний. Химическое травление шлифов усиливает визуальный эффект, обусловлен-

ный изгибом либо разрушением цементитных пластин.

Экспериментально методом растровой электронной микроскопии были зафиксированы колонии пластинчатого перлита, в пределах которых сдвиг материала происходил вдоль границ сопряжения пластин феррита и цементита (рис. 9). Повышенная травимость ферритных промежутков обусловлена, по всей видимости,



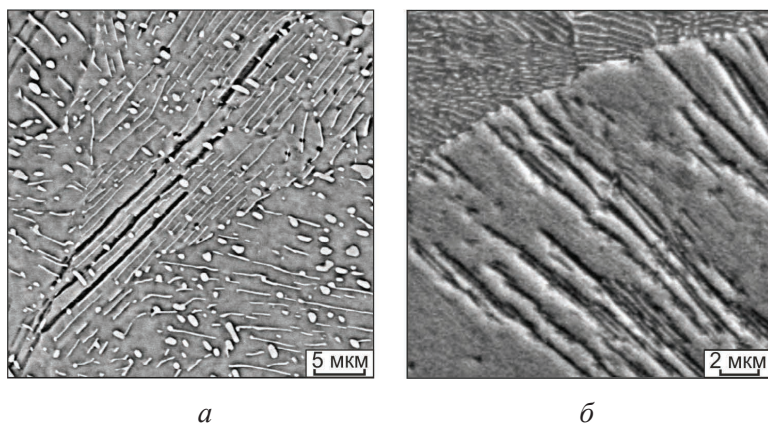


Рис. 9. Локализованный сдвиг ферритной матрицы вдоль межфазных границ при динамическом нагружении образцов из стали У7А (а) и стали 60 (б). Растровая электронная микроскопия

Fig. 9. Localized shift of the ferritic matrix along the interphase boundaries under dynamic loading of specimens from steel U7A (a) and steel 60 (b). Scanning electron microscopy

дефектным состоянием  $\alpha$ -фазы, возникающим в процессе динамического нагружения стали. Ответ на вопрос: «Происходит сдвиг ферритной матрицы между пластинами цементита по механизму двойникования или реализуется иным образом?» – можно было получить на основании трансмиссионных электронно-микроскопических исследований. Однако при изучении многочисленных фольг участки такого типа, анализ которых мог бы позволить объяснить природу локализации пластического течения, найдены не были.

Повышение температуры, обусловленное нагревом заготовок на начальной стадии пластического течения, является фактором, препятствующим проявлению механизма деформационного двойникования. Аналогичный эффект проявляется и при возрастании количества двойников в деформируемом материале. Таким образом, оба отмеченных фактора, сопутствующие процессу пластической деформации, снижают склонность исследуемых сталей к образованию двойников. Механизмом деформации, более предпочтительным для предварительно нагретого в процессе пластического течения материала, становится дислокационное скольжение. Развитие этого механизма приводит к искажению возникших ранее двойников, искривлению их границ, формированию иных дефектов деформационного происхождения.

Особенностью, характерной для взрывного нагружения сталей, является повышенная

склонность к локализации пластического течения. Присутствие в деформируемом материале полос сдвига (рис. 10), не связанных кристаллографически с исходной структурой, является убедительным признаком неоднородности пластического течения материала. Характер преобразований, происходящих в полосе локализованного пластического течения, можно описать как соответствующий системе с обратной положительной связью. Так, если по какой-либо причине в заготовке начинается локализованный сдвиг, материал в деформируемой зоне подвергается нагреву, результатом которого является снижение прочностных свойств материала. Изменение механических свойств, обусловленное термическим разупрочнением материала, интенсифицирует процесс его деформации и дальнейшего нагрева. Таким образом, чем выше степень локализованного пластического течения, чем интенсивнее развивается сдвиг, а следовательно, выше температура нагрева материала, тем дальше деформируемая система уходит от равновесного состояния и приближается к катастрофическому разрушению.

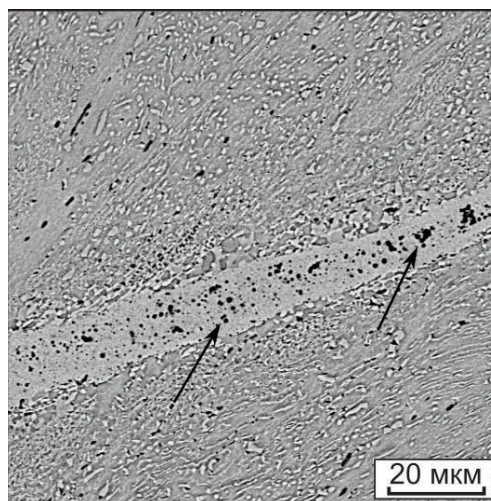


Рис. 10. Полоса локализованного течения, возникшая при взрывном нагружении заготовки из стали У7А. Стрелками указаны пузырьки, зафиксированные при охлаждении

Fig. 10. Localized flow strip, arising from the explosive loading of a steel U7A blank. The arrows indicate the bubbles recorded during cooling

Внутри полос материал может быть нагрет до температуры кипения, о чем свидетельствует образование пузырьков, зафиксированных в процессе ускоренного охлаждения материала (рис. 10).

### Выводы

Пластическая деформация, обусловленная взрывным нагружением сталей с ферритно-перлитной структурой, сопровождается образованием двойников в обеих структурных составляющих. С увеличением степени пластической деформации объемная доля двойников возрастает. Максимальное количество двойников в зерне феррита, зафиксированное методом световой микроскопии, превышает 100. В перлитных колониях содержание двойников на порядок меньше. Ширина большинства двойников в  $\alpha$ -фазе перлита, зафиксированных методом просвечивающей электронной микроскопии, находится в диапазоне  $\sim 10\ldots 100$  нм. Прямолинейное распространение двойников через ферритные зерна и смежные с ними колонии перлита может быть объяснено единством ферритной матрицы в тех микрообъемах, где наблюдается отмеченный факт.

Результаты структурного анализа динамически нагруженных сталей свидетельствуют о сдвиге микрообъемов пластинчатого перлита по плоскостям, параллельным межфазным границам. Образование узких двойников позволяет сделать вывод о локализации пластического течения, характерной для деформации сталей взрывом. Формирования микротрещин, соизмеримых с размерами ферритных зерен или перлитных колоний, природа которых обусловлена двойникованием  $\alpha$ -фазы, не зафиксировано. Наиболее опасный механизм локализации пластического течения, приводящий к возникновению катастрофических трещин, связан с крупными полосами сдвига, направление развития которых не имеет кристаллографической связи со структурными составляющими сталей. Полосы локализованного сдвига устраняют следы возникших ранее двойников. Температура внутри дефектов этого типа, возникших в условиях взрывного нагружения, превышает температуру кипения сталей.

### Список литературы

1. Конева Н.А. Природа стадий пластической деформации // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 10. – С. 99–105.
2. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, Т.Ф. Елсукова, А.Г. Иванчин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1982. – Т. 25, № 6. – С. 5–27.
3. Панин В.Е., Панин А.В. Фундаментальная роль наномасштабного структурного уровня пластической деформации твердых тел // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2006. – № 12. – С. 5–10.
4. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г. Влияние комбинированной мегапластической деформации на структуру и свойства стали 09Г2С // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 52–59. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-52-59.
5. Панин В.Е., Панин А.В. Масштабные уровни пластической деформации разрушения наноструктурированных материалов // Нанотехника. – 2005. – № 3. – С. 28–42.
6. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
7. Конева Н.А., Козлов Э.В. Физическая природа стадийности пластической деформации // Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 123–186.
8. Моисеев В.Ф., Трефилов В.И. Пластичность при двойниковании // Физическая природа пластической деформации и разрушения металлов. – Киев: Наукова думка, 1969. – С. 7–15.
9. Орлов Л.Г., Утевский Л.М. О микродвойниках в железе, деформированном при низких температурах // Физика металлов и металловедение. – 1963. – Т. 16, № 4. – С. 627–629.
10. Moiseev V.F., Trefilov V.I. Change of the deformation mechanism (slip twinning) in polycrystalline  $\alpha$ -Iron // Physica Status Solidi. – 1966. – Vol. 18, N 2. – P. 881–895.
11. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Тихомирова Л.Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. – Новосибирск: Наука, 1993. – 280 с.
12. Перлит в углеродистых сталях / В.М. Счастливцев, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, К.Ю. Окишев, Т.И. Табатчикова, Ю.В. Хлебникова. – Екатеринбург: УРО РАН, 2006. – 402 с.
13. Sundquist B.E. The edgewise growth of pearlite // Acta Metallurgica. – 1968. – N 16. – P. 1413–1426.
14. Счастливцев В.М., Яковлева И.Л. Электронно-микроскопическое исследование структурных превращений в перлите // Физика металлов и металловедение. – 1974. – Т. 38, № 3. – С. 571–579.



15. Hackney S.A., Shiflet G.J. Pearlite growth mechanism // *Acta Metallurgica*. – 1987. – Vol. 35, N 5. – P. 1019–1028.

16. Thompson S.W., Howell P.R. On the early stages of pearlite formation in hypoeutectoid steels // *Scripta Metallurgica*. – 1988. – № 22. – P. 1775–1778.

17. Батаев А.А., Тушинский Л.И., Батаев В.А. Особенности разрушения цементита при деформации сталей со структурой пластинчатого перлита // *Физика металлов и металловедение*. – 1995. – Т. 80, № 5. – С. 148–154.

18. Особенности пластической деформации сталей со структурой пластинчатого перлита / А.А. Батаев, Л.И. Тушинский, В.А. Батаев, Л.Б. Зуев // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 1996. – № 7. – С. 3–10.

19. Howell P.R. The pearlite reaction in steels mechanisms and crystallography: Pt. 1. From H.C. Sorby to R.F. Mehl // *Materials Characterization*. – 1998. – N 40. – P. 227–260.

20. Caballero F.G., García de Andrés C., Capdevila C. Characterization and morphological analysis of pearlite in a eutectoid steel // *Materials Characterization*. – 2000. – N 45. – P. 111–116.

21. Кристаллографический анализ дефектов в структуре пластинчатого перлита углеродистой стали после холодной пластической деформации / Ю.В. Хлебникова, И.Л. Яковлева, Л.Е. Карькина, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2004. – Т. 68, № 5. – С. 661–664.

22. Zhang M.-X., Kelly P.M. The morphology and formation mechanism of pearlite in steels // *Materials Characterization*. – 2009. – N 60. – P. 545–554. – DOI: 10.1016/j.matchar.2009.01.001.

23. Yi H.L. Full pearlite obtained by slow cooling in medium carbon steel // *Material Science and Engineering A*. – 2010. – N 527. – P. 7600–7604. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.08.009.

24. Experimental and theoretical study of the formation and growth of pearlite colonies in eutectoid steels / V.G. Vaks, A.Yu. Stroev, V.N. Urtsev, A.V. Shmakov // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2011. – N 112. – P. 961–978. – DOI: 10.1134/S1063776111050098.

25. Особенности роста пластинчатого перлита в зоне сварки разнородных сталей / А.А. Никулина, А.И. Смирнов, И.А. Батаев, А.А. Батаев, А.И. Попе-

люх // *Физика металлов и металловедение*. – 2016. – Т. 117, № 1. – С. 8–64.

26. Особенности выделения наноразмерных частиц  $\epsilon$ -фазы меди в ферритных промежутках пластинчатого перлита / И.А. Батаев, Н.В. Степанова, А.А. Батаев, А.А. Никулина, А.А. Разумаков // *Физика металлов и металловедение*. – 2016. – Т. 117, № 9. – С. 932–937.

27. Структурные особенности поведения высокоуглеродистой перлитной стали при циклическом нагружении / А.В. Макаров, Р.А. Саврай, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, Л.Ю. Егорова // *Физика металлов и металловедение*. – 2011. – Т. 111, № 1. – С. 97–111.

28. Bowden H.K., Kelly P.M. Deformation twinning in shock-loaded pearlite // *Acta Metallurgica*. – 1957. – Vol. 15. – P. 105–111.

29. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / под ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мурра. – М.: Металлургия, 1984. – 512 с.

30. Mach stem formation in explosion systems, which include high modulus elastic elements / I.A. Balagansky, K. Hokamoto, P. Manikandan, A.D. Matrosov, I.A. Stadnichenko, H. Miyoshi, A.A. Bataev // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – N 110. – P. 123516. – DOI: 10.1063/1.3671063.

31. Эффекты локализации деформации в сплавах на основе Cu, Ti и Fe при нагружении сходящимися ударными волнами / И.В. Хомская, В.И. Зельдович, Б.В. Литвинов, Н.П. Пурыгин // *Физика металлов и металловедение*. – 2004. – Т. 98, № 4. – С. 88–95.

32. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1972. – 188 с.

33. Обработка металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, Г.С. Попов, М.Р. Кръстев. – М.: Металлургия, 1991. – 496 с.

34. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.

35. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 312 с.

36. Electron-microscopic investigation of high-strain-rate deformation produced by shock waves in the pearlitic structure of the grade 40Kh steel / V.I. Zel'dovich, A.E. Kheifets, N.Yu. Frolova, B.V. Litvinov // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2007. – Vol. 103, N 2. – P. 213–217.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.





# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Structural Transformations of Carbon Ferritic-Pearlitic Steels under Conditions of High-Speed Loading

Anatoly Bataev<sup>a</sup>, Ivan Bataev<sup>b</sup>, Aelita Nikulina<sup>c,\*</sup>, Albert Popelyukh<sup>d</sup>,  
Igor Balagansky<sup>e</sup>, Natalia Plotnikova<sup>f</sup>

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6227-5398>, [bataev@adm.nstu.ru](mailto:bataev@adm.nstu.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>, [i.bataev@corp.nstu.ru](mailto:i.bataev@corp.nstu.ru),  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9249-2273>, [a.nikulina@corp.nstu.ru](mailto:a.nikulina@corp.nstu.ru), <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0965-3206>, [popelyux@corp.nstu.ru](mailto:popelyux@corp.nstu.ru),  
<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7708-579X>, [balaganskij@corp.nstu.ru](mailto:balaganskij@corp.nstu.ru), <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8005-1128>, [n.plotnikova@corp.nstu.ru](mailto:n.plotnikova@corp.nstu.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 21 June 2019

Revised: 22 July 2019

Accepted: 15 August 2019

Available online: 15 September 2019

#### Keywords:

Hypoeutectoid steels

Explosion deformation

Deformation twinning

#### Funding

The study was carried out by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 17-72-10226)

### ABSTRACT

**Introduction.** Structure of ferritic-pearlitic steel subjected to explosive loading is investigated using the methods of light microscopy, scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. **Methods.** Steel samples of various shapes and chemical composition are used for testing. Investigation materials are steel 20, 60, U7A in annealed condition. Dynamic loading of samples is performed by deformation schemes of flat plates (disks) using the phenomenon of energy focusing and tube deformation. Structural investigations are carried out by Carl Zeiss Axio Observer Z1m light microscope, EVO 50 XVP scanning electron microscope and FEI Tecnai G2 20 TWIN transmission electron microscope. **Results And Discussion.** The peculiarity characteristic belongs to the initial stage of deformation of the investigation materials is the twinning process, which takes place both in ferritic grains and in the colonies of lamellar pearlite. Analysis of the data obtained during transmission electron microscopy shows that the width of the twins has a great range. There are both the thin twins with a width of 10–15 nm order and the wide ones, the thickness of which is up to 100 nm. This range is observed in both ferritic grains and pearlitic colonies. Twins of deformation nature within a single colony can be represented as a set of multiple microtwins, separated by cementite plates. It is noted the through movement of twins which happened through grains of ferrite and adjacent colonies of pearlite. It indicates the unity of the ferrite matrix within these structural components. Heating of steel samples and increasing the density of twins are factors that impede the twinning process and initiate the mechanism of deformation by sliding. The change of the deformation mechanism is accompanied by the areas of curvature or even the complete degradation of the twins formed at the initial stage of loading.

**For citation:** Bataev A.A., Bataev I.A., Nikulina A.A., Popelyukh A.I., Balagansky I.A., Plotnikova N.V. Structural transformations of carbon ferritic-pearlitic steels under conditions of high-speed loading. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 115–128. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-115-128. (In Russian).

### References

1. Koneva H.A. Priroda stadii plasticheskoi deformatsii [Nature of stages of plastic deformation]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal*, 1998, no. 10, pp. 99–105.
2. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Elsukova T.F., Ivanchin A.G. Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel [Structural levels of deformation in solids]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Soviet Physics Journal*, 1983, vol. 25, no. 6, pp. 5–27.
3. Panin V.E., Panin A.B. Fundamental'naya rol' nanomasshtabnogo strukturnogo urovnya plasticheskoi deformatsii tverdykh tel [Fundamental role of the nanostructural level of plastic deformation in solids]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2006, no. 11–12, pp. 5–10. (In Russian).

#### \* Corresponding author

Nikulina Aelita A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Novosibirsk State Technical University,  
 20 Prospekt K. Marksa,  
 630073, Novosibirsk, Russian Federation  
 Tel.: +7 (383) 346-11-71, e-mail: [a.nikulina@corp.nstu.ru](mailto:a.nikulina@corp.nstu.ru)

4. Yakovleva S.P., Makharova S.N., Mordovskoi P.G. Vliyanie kombinirovannoi megaplasticheskoi deformatsii na strukturu i svoistva stali 09G2S [Structure and mechanical properties of the low-carbon steel after severe plastic deformation and forging]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 52–59. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-52-59.

5. Panin V.E., Panin A.B. Masshtabnye urovni plasticheskoi deformatsii razrusheniya nanostrukturirovannykh materialov [Scale levels of plastic deformation and destruction of nanostructured materials]. *Nanotekhnika = Nanotechnology*, 2005, no. 3, pp. 28–42.

6. Rybin V.V. *Bol'shie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov* [Large plastic deformation and destruction of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 224 p.

7. Koneva H.A., Kozlov E.V. Fizicheskaya priroda stadiinosti plasticheskoi deformatsii [Physical nature of stages in plastic deformation]. *Strukturnye urovni plasticheskoi deformatsii i razrusheniya* [Structural levels of plastic deformation and fracture]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, pp. 123–189.

8. Moiseev V.F., Trefilov V.I. Plastichnost' pri dvoinikovanii [Plasticity in twinning]. *Fizicheskaya priroda plasticheskoi deformatsii i razrusheniya metallov* [The physical nature of plastic deformation and destruction of metals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1969, pp. 7–15.

9. Orlov L.G., Utevskii L.M. O mikrodvoinikakh v zheleze, deformirovannom pri nizkikh temperaturakh [On microtwins in iron deformed at low temperatures]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 1963, vol. 16, no. 4, pp. 627–629. (In Russian).

10. Moiseev V.F., Trefilov V.I. Change of the deformation mechanism (slip twinning) in polycrystalline  $\alpha$ -Iron. *Physica Status Solidi*, 1966, vol. 18, no. 2, pp. 881–895.

11. Tushinskii L.I., Bataev A.A., Tikhomirova L.B. *Struktura perlita i konstruktivnaya prochnost' stali* [Pearlite structure and structural strength of steel]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993. 280 p.

12. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L., Okishev K.Yu., Tabatchikova T.I., Khlebnikova Yu.V. *Perlit v uglerodistykh stalyakh* [Pearlite in carbon steels]. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2006. 402 p.

13. Sundoquist B.E. The edgewise growth of pearlite. *Acta Metallurgica*, 1968, no. 16, pp. 1413–1426.

14. Schastlivtsev V.M., Yakovleva I.L. Elektronnomikroskopicheskoe issledovanie strukturnykh prevrashchenii v perlite [Electron microscopic study of structural transformations in pearlite]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 1974, vol. 38, no. 3, pp. 571–579. (In Russian).

15. Hackney S.A., Shiflet G.J. Pearlite growth mechanism. *Acta Metallurgica*, 1987, vol. 35, no. 5, pp. 1019–1028.

16. Thompson S.W., Howell P.R. On the early stages of pearlite formation in hypoeutectoid steels. *Scripta Metallurgica*, 1988, no. 22, pp. 1775–1778.

17. Bataev A.A., Tushinskii L.I., Bataev V.A. Osobennosti razrusheniya tsementita pri deformatsii stalei so strukturoi plastinchatogo perlita [Features of the destruction of cementite during the deformation of steels with a lamellar pearlite structure]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 1995, vol. 80, no 5, pp. 148–154. (In Russian).

18. Bataev A.A., Tushinskii L.I., Bataev V.A., Zuev L.B. Features of the plastic deformation of steels with lamellar pearlite structure. *Russian Physics Journal*, 1996, no. 7, pp. 603–608. Translated from *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 1996, no. 7, pp. 3–10.

19. Howell P.R. The pearlite reaction in steels mechanisms and crystallography: Pt. 1. From H.C. Sorby to R.F. Mehl. *Materials Characterization*, 1998, no. 40, pp. 227–260.

20. Caballero F.G., García de Andrés C., Capdevila C. Characterization and morphological analysis of pearlite in a eutectoid steel. *Materials Characterization*. 2000, no. 45, pp. 111–116.

21. Khlebnikova Yu.V., Yakovleva I.L., Kar'kina L.E., Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I. Kristallograficheskii analiz defektov v strukture plastinchatogo perlita uglerodistoi stali posle kholodnoi plasticheskoi deformatsii [Crystallographic analysis of defects in the structure of carbon steel plate pearlite after cold plastic deformation]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2004, vol. 68, no. 5, pp. 661–664. (In Russian).

22. Zhang M.-X., Kelly P.M. The morphology and formation mechanism of pearlite in steels. *Materials Characterization*, 2009, no. 60, pp. 545–554. DOI: 10.1016/j.matchar.2009.01.001.

23. Yi H.L. Full pearlite obtained by slow cooling in medium carbon steel. *Material Science and Engineering A*, 2010, no. 527, pp. 7600–7604. DOI: 10.1016/j.msea.2010.08.009.

24. Vaks V.G., Stroev A.Yu., Urtsev V.N., Shmakov A.V. Experimental and theoretical study of the formation and growth of pearlite colonies in eutectoid steels. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2011, no. 112, pp. 961–978. DOI: 10.1134/S1063776111050098.

25. Nikulina A.A., Smirnov A.I., Bataev I.A., Bataev A.A., Popelyukh A.I. Growth of lamellar pearlite in the weld zone between dissimilar steels. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, no. 1, pp. 54–60. DOI: 10.1134/S0031918X16010105. Translated from *Fizika metallov i metallovedenie*, 2016, vol. 117, no. 1, pp. 8–64.

26. Bataev I.A., Stepanova N.V., Bataev A.A., Nikulina A.A., Razumakov A.A. Peculiarities of the precipitation of nanosized  $\epsilon$ -phase copper particles in ferrite plates of lamellar pearlite. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, no. 9, pp. 901–905. DOI: 10.1134/S0031918X16090015. Translated from *Fizika metallov i metallovedenie*, 2016, vol. 117, no. 9, pp. 932–937.

27. Makarov A.V., Savrai R.A., Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Egorova L.Y. Structural features of the behavior of a high-carbon pearlitic steel upon cyclic loading. *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 111, no. 1, pp. 95–109. Translated from *Fizika metallov i metallovedenie*, 2011, vol. 111, no. 1, pp. 97–111.

28. Bowden H.K., Kelly P.M. Deformation twinning in shock-loaded pearlite. *Acta Metallurgica*, 1957, vol. 15, pp. 105–111.

29. Meyers M.A., Murr L.E., eds. *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals: concepts and applications*. New York, London, Plenum Press, 1981 (Russ. ed.: *Udarnye volny i yavleniya vysokoskorostnoi deformatsii metallov*. Ed. by M.A. Meyers, L.E. Murr. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 512 p.).

30. Balagansky I.A., Hokamoto K., Manikandan P., Matrosov A.D., Stadnichenko I.A., Miyoshi H., Bataev A.A. Mach stem formation in explosion systems, which include high modulus elastic elements. *Journal of Applied Physics*, 2011, no. 110 (12), p. 123516. DOI: 10.1063/1.3671063.

31. Khomskaya I.V., Zel'dovich V.I., Litvinov B.V., Purygin N.P. Localization of deformation in copper-, titanium-, and iron-based alloys loaded with convergent shock waves. *The Physics of Metals and Metallography*, 2004, vol. 98, no. 4, pp. 420–427. Translated from *Fizika metallov i metallovedenie*, 2004, vol. 98, no. 4, pp. 88–95.

32. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Hardening and explosion welding physics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972. 188 p.

33. Krupin A.V., Solov'ev V.Ya., Popov G.S., Kr'stev M.R. *Obrabotka metallov vzryvom* [Processing of metals by explosion]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 496 p.

34. Zakharenko I.D. *Svarka metallov vzryvom* [Welding of metals by explosion]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1990. 205 p.

35. Gol'dshtein M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. *Metallofizika vysokoprochnykh splavov* [Metal physics of high-strength alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 312 p.

36. Zel'dovich V.I., Kheifets A.E., Frolova N.Yu., Litvinov B.V. Electron-microscopic investigation of high-strain-rate deformation produced by shock waves in the pearlitic structure of the grade 40Kh steel. *The Physics of Metals and Metallography*, 2007, vol. 103, no. 2, pp. 213–217.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).