

УДК 669.017:669.15-194.018.26

## ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ IF-СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ХОЛОДНОЙ ОСАДКИ И ОТЖИГА

КУЦОВА В. З.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
 ИВАНЧЕНКО В. Г.<sup>2</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
 КОТОВА Т. В.<sup>3\*</sup>, к. т. н., доц.,  
 ПЛОШЕНКО А. П.<sup>4</sup>, асп.

<sup>1,3\*,4</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49005, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 0562 47 42 49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>2</sup> Отдел процессов и машин обработки металлов давлением, Институт черной металлургии имени З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Стародубова, 1, 49005, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 0567 76 53 15, e-mail: [office@isi.gov.ua](mailto:office@isi.gov.ua)

**Аннотация. Постановка проблемы.** Для изготовления изделий холодной штамповкой традиционно используют низкоуглеродистые стали, которые имеют относительно высокую пластичность и могут подвергаться значительной деформации без опасности разрушения и с минимальными энергетическими затратами. Недостатком углеродистых сталей является склонность к деформационному старению. Повышение требований к качеству изделий привело к появлению нового класса сталей с низким содержанием углерода и азота (IF-стали). Уровень их производства в мире постоянно увеличивается. IF-стали обладают хорошей штампуемостью, а сочетание высокой прочности и пластичности позволяет сохранять высокую конструктивную прочность изделий в аварийных ситуациях. Главные факторы упрочнения IF-сталей – измельчение зерна ферритной матрицы, легирование твердого раствора, регулирование плотности дислокаций и субструктуры при холодной прокатке, дополнительные – выделение из твердого раствора дисперсных частиц упрочняющих фаз и текстурное упрочнение. Низкие значения отношения  $\sigma_r/\sigma_b$  и высокая степень деформационного упрочнения IF-сталей гарантируют высокие прочностные свойства и однородность толщины штампованных деталей. Использование этих сталей вместо обычных низкоуглеродистых обеспечивает при сохранении прочности снижение массы пропорционально глубине вытяжки. Результаты исследования микроструктуры и микротвердости IF-сталей после холодной осадки могут быть полезны при холодной объемной листовой штамповке или холодной высадке крепежных деталей. В технологии внепечной обработки жидкой стали применяется обработка лигаатурами, содержащими кальций. Влияние кальция на структуру и свойства стали проявляется в последовательной реализации многостадийного процесса, обусловленного его высокой химической активностью: рафинирование жидкого металла, глобуляризация неметаллических включений, модифицирование макро- и микроструктуры и т. п. Таким образом, исследования влияния температурно-деформационных режимов обработки на структуру и свойства IF-сталей являются актуальными. **Цель работы** – исследование влияния холодной осадки с последующим отжигом на эволюцию структуры и механические свойства горячекатаных IF-сталей. **Вывод.** Исследованы структура, размер зерен, плотность дислокаций, микротвердость сталей 01ЮТА и 01ЮТА\* после прокатки, холодной осадки и отжига. Исследованные стали характеризуются различной способностью к деформации и лучшей штампуемостью стали 01ЮТА\*.

*Ключевые слова:* горячекатаная сталь, прокатка, холодная осадка, отжиг, структура, микротвердость.

## ФОРМУВАННЯ МИКРОСТРУКТУРИ І МИКРОТВЕРДОСТІ ГАРЯЧЕКАТАНИХ IF-СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ХОЛОДНОЇ ОСАДКИ ТА ВІДПАЛУ

КУЦОВА В. З.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
 ИВАНЧЕНКО В. Г.<sup>2</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
 КОТОВА Т. В.<sup>3\*</sup>, к. т. н., доц.,  
 ПЛОШЕНКО Г. П.<sup>4</sup>, асп.

<sup>1,3\*,4</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49005, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 0562 47 42 49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>2</sup> Відділ процесів і машин обробки металів тиском, Інститут чорної металургії імені З. І. Некрасова НАН України, пл. Стародубова, 1, 49005, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 0567 76 53 15, e-mail: [office@isi.gov.ua](mailto:office@isi.gov.ua)

**Анотація. Постановка проблеми.** Для виготовлення виробів холодною штамповкою традиційно використовують низьковуглецеві сталі, які характеризуються високою пластичністю і можуть піддаватись значній деформації без руйнування і з мінімальними енергетичними витратами. Недолік вуглецевих сталей – схильність до деформационного

старіння. Підвищення вимог до якості виробів зумовило появу нового класу сталей з низьким вмістом вуглецю й азоту (IF-сталі). Рівень їх виробництва у світі постійно збільшується. IF-сталі здатні до штамповки, а поєднання високої міцності і пластичності дозволяє зберігати високу конструктивну міцність виробів в аварійних ситуаціях. Головні фактори зміцнення IF-сталей – подрібнення зерна феритної матриці, легування твердого розчину, регулювання щільності дислокацій і субструктури під час холодної прокатки, додаткові – виділення із твердого розчину дисперсних часток зміцнювальних фаз і текстурні зміцнення. Низькі значення відношення  $\sigma_t/\sigma_b$  і високий ступінь деформаційного зміцнення IF-сталей гарантують високі міцнісні властивості та однорідність товщини штампованих деталей. Використання цих сталей замість звичайних низьковуглецевих забезпечує при зберіганні міцності зниження маси, пропорційне глибини витяжки. Результати дослідження мікроструктури і мікротвердості IF-сталей після холодної осадки можуть бути корисні для холодної об'ємної листової штамповки чи холодної висадки кріпильних деталей. В технології позапічної обробки рідкої сталі застосовується обробка лігатурами, що містять кальцій. Вплив кальцію на структуру і властивості сталі проявляється в поступовій реалізації багатостадійного процесу, зумовленого його високою хімічною активністю: рафінування рідкого металу, глобуляризація неметалевих включень, модифікування макро- і мікроструктури і тощо. Таким чином, дослідження впливу температурно-деформаційних режимів обробки на структуру і властивості IF-сталей є актуальними. **Мета роботи** – дослідження впливу холодної осадки з наступним відпалом на еволюцію структури і механічні властивості гарячекатаних IF-сталей. **Висновок.** Досліджено структуру, розмір зерен, щільність дислокацій, мікротвердість сталей 01ЮТА і 01ЮТА\* після прокатки, холодної осадки та відпалу. Досліджені сталі характеризуються різною здатністю до деформації і кращою штампованістю сталі 01ЮТА\*.

*Ключові слова:* гарячекатана сталь, прокатка, холодна осадка, відпал, структура, мікротвердість

## MICROSTRUCTURES AND MICROHARDNES FORMATION OF HOT-ROLLED IF-STEELS AFTER COLD UPSETTING AND ANNEALING

KUTZOVA V. Z.<sup>1</sup>, *Doct. Sc. (Tech.), Prof.*,  
IVANCHENKO V. G.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), S. R. F.*,  
KOTOVA T. V.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. of Prof.*,  
PLOSHENKO G. P.<sup>4</sup>, *Postgrad.*

<sup>1,3,4</sup> Department of material science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin, 4 av., 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 0562 47 42 49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>2</sup> Department of processes and metal forming machines, Z. I. Nekrasova Institute of Ferrous Metallurgy, Sq. Starodubova, 1, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 0567 76 53 15, e-mail: [office@isi.gov.ua](mailto:office@isi.gov.ua)

**Summary. Raising of problem.** The low carbon steels which have relatively high plasticity and can undergo significant deformation without the danger of the fracture and with minimum energy costs are used for the manufacture of cold formed conventionally. The disadvantage of the carbon steels is a tendency to strain aging. The increasing quality requirements products has led to the new class of steels with low carbon and nitrogen contents (IF-steel). The level of their production in the world is constantly increasing. IF-steels have good formability and the combination of high strength and ductility allows to maintain high structural strength of products in emergency situations. The ferritic matrix grain refinement, solid solution alloying, regulation dislocation density and substructures in cold rolling, optional - selection of the particulate solid solution strengthening and texture strengthening phases are the main IF-steels hardening factors. The low ratio values  $\sigma_t/\sigma_b$  and high degree of strain hardening IF-steel are guaranteed high strength properties and thickness uniformity of stamping parts. The using low-carbon steels instead of the usual steels will provide strength while maintaining weight reduction is proportional to the depth of the hood. The study microstructure and microhardness results of the IF-steels after cold rainfall may be useful in cold bulk stamping sheet or cold heading fasteners. The technology of furnace treatment of liquid steel processing is applied ligatures containing calcium. Influence of calcium on the steel's structure and properties is manifested in the consistent implementation of the multi-stage process, due to its high chemical activity: refining liquid metal globularization nonmetallic inclusions, modify the macro - and microstructure, etc. Thus, investigations of the temperature and deformation modes of treatment influences on the structure and properties of the IF-steels are relevant. **Purpose** – to study the influence of cold shrink with followed annealing to the structure and mechanical properties evolutions of hot rolled IF-steels. **Conclusion.** The structure, grains size, dislocation density, microhardness of steels 01ЮТА and 01ЮТА\* after rolling, cold upsetting and annealing were investigated. The analyzed steels are characterized by different ability to deformation and it was concluded that steel 01ЮТА\* has better formability.

*Keywords:* hot-rolled steel, rolling, cold upsetting, annealing, structure, microhardness

### Введение

Для изготовления изделий холодной штамповкой традиционно используют низкоуглеродистые стали, которые имеют относительно высокую пластичность и могут подвергаться значительной деформации без опасности разрушения и с минимальными энергетическими затратами. Недостатком углеродистых сталей является склонность к деформационному старению. Повышение требований к качеству изделий привело к появлению нового класса сталей с низким содержанием углерода и азота (IF-стали). Уровень их производства в мире постоянно увеличивается [1; 2]. IF-стали обладают хорошей штампуемостью, а сочетание высокой прочности и пластичности позволяет сохранять высокую конструктивную прочность изделий в аварийных ситуациях [3–5].

Главные факторы упрочнения IF-сталей – измельчение зерна ферритной матрицы, легирование твердого раствора, регулирование плотности дислокаций и субструктуры при холодной прокатке, дополнительные – выделение из твердого раствора дисперсных частиц упрочняющих фаз и текстурные упрочнения [6; 7].

Низкие значения отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  и высокая степень деформационного упрочнения IF-сталей гарантируют высокие прочностные свойства и однородность толщины штампованных деталей. Использование этих сталей вместо обычных низкоуглеродистых обеспечивает при сохранении прочности снижение массы пропорционально глубине вытяжки [8–10]. Результаты исследования

микроструктуры и микротвердости IF-сталей после холодной осадки могут быть полезны при холодной объемной листовой штамповке или холодной высадке крепежных деталей.

В технологии внепечной обработки жидкой стали применяется обработка лигатурами, содержащими кальций. Влияние кальция на структуру и свойства стали проявляется в последовательной реализации многостадийного процесса, обусловленного его высокой химической активностью: рафинирование жидкого металла, глобуляризация неметаллических включений, модифицирование макро- и микроструктуры и т. п. Таким образом, исследование влияния температурно-деформационных режимов обработки на структуру и свойства IF-сталей являются актуальными.

Цель работы – исследование влияния холодной осадки с последующим отжигом на эволюцию структуры и механические свойства горячекатаных IF-сталей.

### Материал и методика исследований

В работе исследовали стали 01ЮТА и 01ЮТА\* после горячей прокатки, холодной осадки и отжига, их химический состав приведен в таблице 1.

Экспериментальные исследования температурно-деформационных условий прокатки проводили на лабораторном прокатном стане ДУО 280. Температурно-деформационные режимы прокатки стали представлены в таблице 2.

После прокатки стали 01ЮТА и 01ЮТА\* подвергали холодной осадке (табл. 3).

Таблица 1

### Химический состав IF- сталей / Chemical composition of IF-steels

Марка стали	Содержание химических элементов, % (по массе)											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N <sub>2</sub>	Ca
01ЮТА	0,003	0,13	0,02	0,008	0,012	0,01	0,01	0,02	0,041	0,056	0,004	–
01ЮТА*	0,003	0,12	0,01	0,005	0,011	0,01	0,01	0,02	0,041	0,07	0,004	0,0003

Примечание: \* – дополнительно содержит кальций.

Таблица 2

### Деформационные режимы обработки сталей IF-steels / Temperatures and deformation modes of the rolling of IF-steels

Марка стали	$T_{нагр}$	$T_{1пр}$	$h_0$	$h_1$	$\Delta h_1$	$\varepsilon_1$	$T_{2пр}$	$h_2$	$\Delta h_2$	$\varepsilon_2$	$\Sigma \Delta h$	$\Sigma \varepsilon$	$T_{см}$
	°C		мм			%	°C	мм		%	мм	%	°C
01ЮТА	1 000	970...980	3,5	1,80	1,70	48,6	730...740	1,35	0,45	25,0	2,15	61,4	660...680
01ЮТА*								1,4	0,4	22,2	2,1	60,0	

Примечание:  $T_{нагр}$  – температура нагрева листовой стали;  $T_{1пр}$  – температура прокатки листовой стали в первом проходе;  $T_{2пр}$  – температура прокатки листовой стали во втором проходе;  $h_0$  – исходная толщина образца;  $h_1$  – толщина образца после первого прохода;  $h_2$  – толщина образца после второго прохода;  $\Delta h_1$  – абсолютное обжатие металла в первом проходе;  $\Delta h_2$  – абсолютное обжатие металла во втором проходе;  $\Sigma h$  – суммарное обжатие металла за два прохода;  $\varepsilon_1$  – относительная степень деформации металла в первом проходе;  $\varepsilon_2$  – относительная степень деформации металла во втором проходе;  $\Sigma \varepsilon$  – суммарная степень деформации металла за два прохода;  $T_{см}$  – температура смотки.

Параметры осадки IF-сталей / Upsetting parameters of IF-steels

Марка стали	$\epsilon_0, \%$	$S_0, \text{мм}$	$T_{\text{осадки}}, ^\circ\text{C}$	$S_1, \text{мм}$	$\epsilon_1, \%$
01ЮТА	61	1,35	27	0,5	63
01ЮТА*	60	1,4		0,45	68

Примечание:  $T_{\text{нагр.}}$ ,  $^\circ\text{C}$  – температура нагрева;  $T_{\text{осадки.}}$ ,  $^\circ\text{C}$  – температура осадки;  $S_0$  – толщина полосы до испытания;  $S_1$  – толщина полосы после испытания;  $\epsilon_0$  – степень деформации до испытания;  $\epsilon_1$  – степень деформации после испытания.

Рекристаллизационный отжиг проводили при температуре  $T = 690$   $^\circ\text{C}$  с выдержкой  $\tau = 4$  ч. Фазовый состав сталей 01ЮТА и 01ЮТА\* изучали на дифрактометре ДРОН-3М в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении. Для исследования общей структуры применяли оптический микроскоп «Nikon Eclipse MA-200». Микротвердость измеряли с помощью микротвердомера «FM-700» фирмы FutureTech при нагрузке 500 г.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Микроструктура сталей 01ЮТА (рис. 1 а) и 01ЮТА\* (рис. 1 б), деформированных в аустенитной и ферритной областях температур и охлажденных с печью, характеризуются наличием мелких и крупных зерен феррита. Размер зерен для стали 01ЮТА составляет 30...50  $\mu\text{м}$  и 10...100  $\mu\text{м}$  для стали 01ЮТА\*.

В деформированных образцах наблюдаются структурные изменения, которые свидетельствуют о реализации процессов рекристаллизации и полигонизации. В поверхностной зоне деформированного листа процессы вторичной рекристаллизации развиваются более интенсивно, что и приводит к образованию разнотермической структуры. Причиной формирования различной величины зерна является неравномерная деформация металла, что приводит к образованию трещин при штамповке. Поскольку IF-стали отличаются ультранизким содержанием углерода (тысячные доли процента по массе), и раскислены титаном, образование карбидов и нитридов способствует уменьшению размера зерна [11].

Для получения равномерной структуры в листах из IF-сталей, деформированных в последнем проходе в ферритном интервале температур, возможно снижение температуры смотки. Одним из вариантов получения рекристаллизованных равноосных зерен возможно проведение дополнительной операции термической обработки (отжиг не выше температуры  $A_{c1}$  при 690...710  $^\circ\text{C}$  в течение 3...5 ч) [12].

В настоящей работе горячекатаный лист из IF-сталей подвергали дополнительной деформации – холодной осадке с последующим отжигом при  $T = 690$   $^\circ\text{C}$  в течение 3 часов. Испытание на осадку позволяет определить способность материала воспринимать заданную величину деформации. После осадки наблюдается ферритная структура, которая характеризуется разнотермической

в результате неравномерной деформации. В стали 01ЮТА сформировалась структура с зернами вытянутой формы и близкой к равноосной. Сравнительный анализ структуры сталей 01ЮТА и 01ЮТА\* после осадки показал более высокую текстурованность стали 01ЮТА (рис. 1 в) и большее количество крупных зерен в структуре стали 01ЮТА\* (рис. 1 г). В процессе осадки в металле возникает преимущественная ориентировка зерен (текстура) в зависимости от направления течения металла, что обуславливает анизотропию свойств.

Рекристаллизационный отжиг осуществляли с целью снятия наклепа и внутренних напряжений в стали после холодной осадки, что привело к снижению твердости и росту пластичности. Отжиг проводили при температуре 690  $^\circ\text{C}$  в течение 4 ч с последующим охлаждением с печью. Микроструктуры сталей 01ЮТА и 01ЮТА\* после рекристаллизационного отжига показаны на рисунке 1 д, е. Размер зерна в структуре отожженной стали 01ЮТА составляет 20...180  $\mu\text{м}$ , в структуре стали 01ЮТА\* – 20...190  $\mu\text{м}$ .

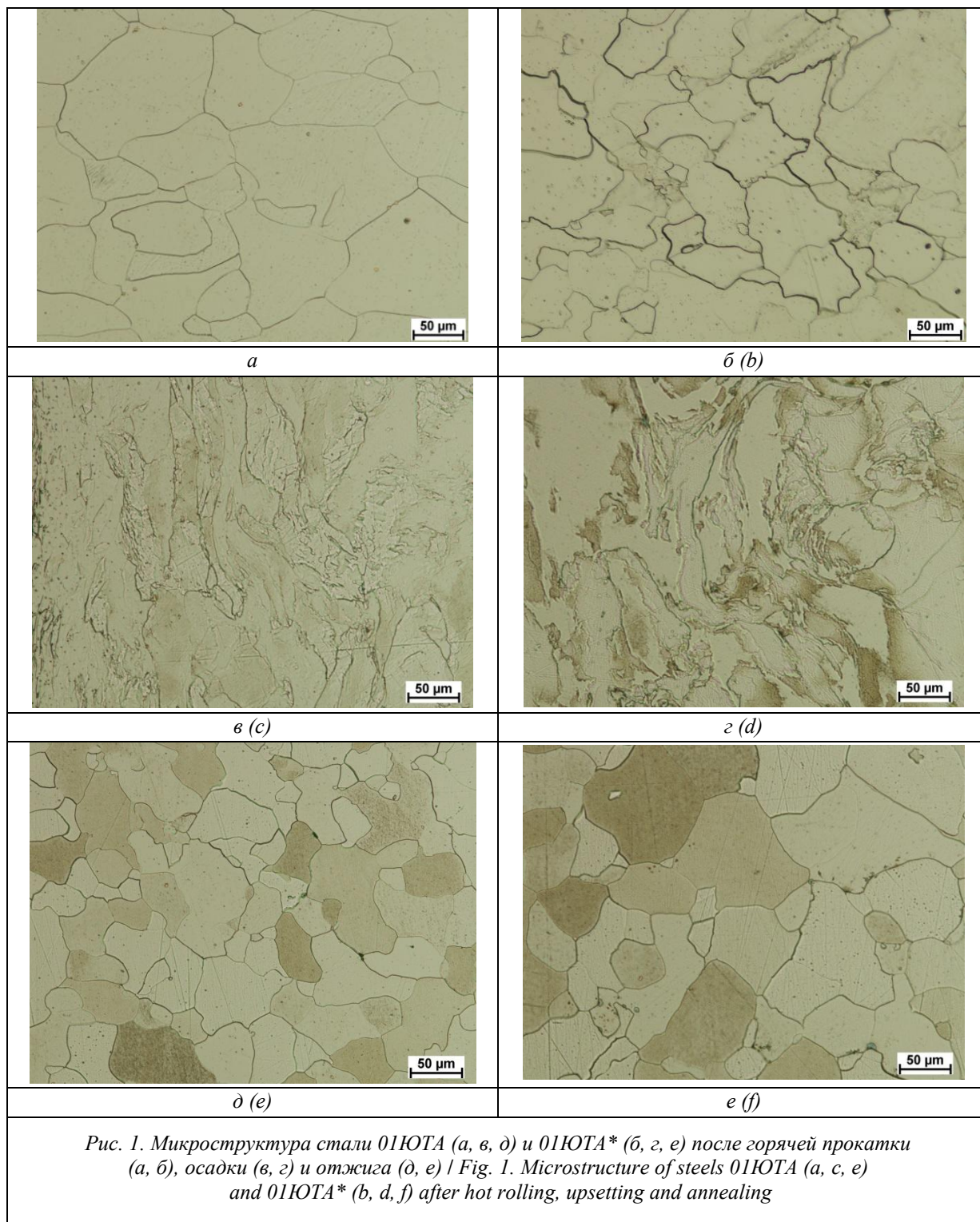
Микротвердость стали 01ЮТА после прокатки составляет 133 HV (рис. 2). Наличие кальция в составе стали 01ЮТА\* приводит к снижению микротвердости до 119 HV. В стали 01ЮТА\* на поверхности внутризеренного вязкого излома появляются округлые неметаллические включения сульфидов и окиси сульфидов, содержащие кальций, которые в силу своей морфологии не оказывают охрупчивающего влияния по сравнению с плоскими остроугольными протяженными выделениями карбонитридов и сульфидов на границах зерен, что положительно влияет на пластичность металла. Сравнительно малое содержание кальция (0,005...0,008 %), которое достаточно для глобулизации сульфидов, свидетельствует о предпочтительности применения кальция по сравнению с другими модификаторами, например, церием (в количестве не менее 0,06 %) для ликвидации межкристаллитного охрупчивания [13].

После осадки микротвердость стали 01ЮТА уменьшается и составляет – 122 HV, а для стали 01ЮТА\* составляет 126 HV. Повышение микротвердости стали 01ЮТА\* в сравнении со сталью 01ЮТ происходит из-за снижения загрязненности неметаллическими включениями, а также за счет того, что кальций, являясь сильным поверхностно-активным элементом с повышенной гомофильностью в железных сплавах, препятствует

обогащению титаном, медью и фосфором границ зерен, улучшая прочностные свойства, пластичность и штампуемость стали [13].

Рекристаллизационный отжиг способствует снижению значений микротвердости для обеих

сталей, после отжига микротвердость составила ~ 80 HV. Снижение микротвердости произошло в результате собирательной рекристаллизации и укрупнения зерен феррита.



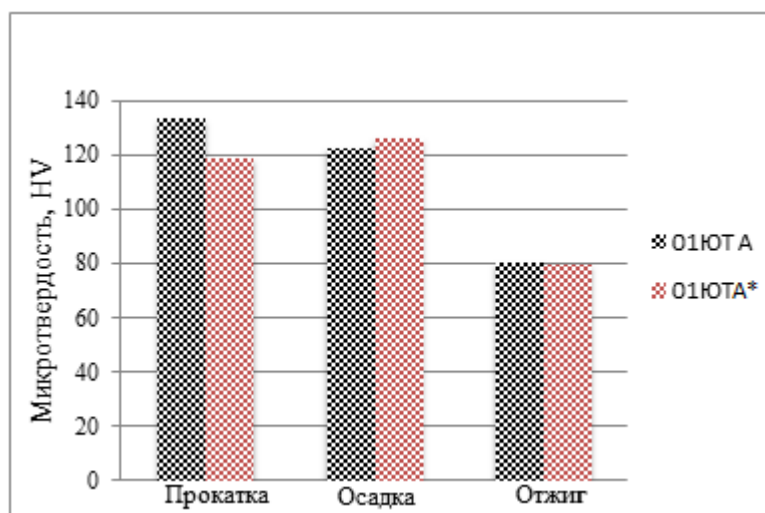


Рис. 2. Микротвердость сталей 01ЮТА и 01ЮТА\* после прокатки, осадки и отжига /  
Fig. 2. Microhardness of steels 01ЮТА and 01ЮТА\* after hot rolling, upsetting and annealing

Данные рентгеноструктурного анализа ИФ-сталей приведены в таблице 4. Наличие кальция в составе стали 01ЮТА\* не оказывает влияния на параметр решетки как при прокатке, так и при осадке с последующим отжигом (табл. 4).

В то же время, средний размер кристаллитов уменьшился в стали 01ЮТА после осадки почти в 2 раза, а средний размер кристаллитов в стали 01ЮТА\* увеличился на 5 %. К тому же, изменение размеров кристаллитов в исследуемых сталях отличается по разным кристаллографическим плоскостям: в стали 01ЮТА размер кристаллитов по плоскостям 110 и 220 уменьшился в 1,5//2 раза, а в стали 01ЮТА\* увеличился после осадки на 5 % в плоскости 110 и снизился на 17 % в плоскости 220. Отжиг приводит к формированию кристаллитов близких размеров в обеих сталях (табл. 4).

Напряжения в стали 01ЮТА после прокатки выше, чем в стали 01ЮТА\*, почти в 2 раза. И осадка, и последующий отжиг приводят к снижению напряжений в стали 01ЮТА на 35 %, а в стали 01ЮТА\* после осадки напряжения увеличиваются на

30 %. Отжиг снижает значения напряжений по сравнению с прокатанным состоянием в обеих сталях на 7...38 %.

Плотность дислокаций для обеих сталей возрастает после осадки и уменьшается после отжига. Причем для стали 01ЮТА плотность дислокаций после осадки по разным плоскостям составляет 30,1 и 60,4  $\times 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. По-видимому, кальций, вытесняя с границ зерен титан, азот и другие элементы, не только затрудняет образование охрупчивающих выделений, но приводит к увеличению содержания их в твердом растворе внутри зерна, что обеспечивает упрочнение феррита. В то же время, осадка листа стали 01ЮТА\* приводит к менее значительному изменению плотности дислокаций, изменения размеров кристаллитов в этой стали также менее значительны, чем в стали 01ЮТА.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о разной способности к деформации исследованных сталей и лучшей штампуемости стали 01ЮТА\*.

Таблица 4

Данные рентгеноструктурного анализа ИФ-сталей после прокатки, осадки и отжига /  
X-ray diffraction analysis data of if-steels after rolling, upsetting and annealing

Марка стали	$a$ , nm	$L_{110}$ , nm	$L_{220}$ , nm	$L$ , nm	$M$ , 10 <sup>-3</sup>	$D_{110}$ , 10 <sup>10</sup> см <sup>-2</sup>	$D_{220}$ , 10 <sup>10</sup> см <sup>-2</sup>
01ЮТА (прокатка)	0,287	91,3	61,8	119,4	1,6	6,65	5,61
01ЮТА (осадка)	0,287	42,9	39,5	56,3	1,03	30,1	60,4
01ЮТА (отжиг)	0,287	99,2	68,1	128,8	1,03	5,61	23,7
01ЮТА* (прокатка)	0,287	90,4	69,3	118,1	0,91	6,7	23,4
01ЮТА* (осадка)	0,287	95,1	57,7	125,5	1,28	6,9	28,5
01ЮТА* (отжиг)	0,286	97,7	74,3	126,7	0,85	5,79	19,9

Примечание:  $a$  – параметр решетки,  $L$  – размер кристаллитов,  $M$  – напряжение,  $D$  – плотность дислокаций.

### Выводы

Исследованы структура, размер зерен, плотность дислокаций, микротвердость сталей 01ЮТА и 01ЮТА\* после прокатки, холодной осадки и отжига. Показано, что кальций способствует усилению разноструктурности после прокатки. После отжига зерно в стали 01ЮТА\* укрупняется, разноструктурность сохраняется. Микротвердость стали 01ЮТА\* в сравнении со сталью 01ЮТА снижается после прокатки, но увеличивается после осадки, а после отжига сохраняется на одинаковом уровне. Отжиг исследованных сталей уменьшает напряжения, формирует структуру, максимально приближенную к равновесной, в результате

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Сторожева Л. М. Ультранизкоуглеродистые стали для автомобилестроения с эффектом упрочнения при сушке готовых деталей / Л. М. Сторожева // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – Днепропетровск : ПГАСА, 2001. – № 9. – С. 9–17.

Storozheva L. M. *Ul'tranizkouglerodistyie stali dlya avtomobilestroeniya s effektivom uprochneniya pri sushke gotovykh detaley* [Ultra-low carbon steel for the automotive industry with the effect of hardening during the drying of the finished parts]. *Physical metallurgy and heat treatment of metals*. Dnipropetrovsk : PSAE&A. 2001. No. 9. Pp. 9–15. (in Russian).

<http://mitom.folium.ru/contents.htm>

2. Гешелин В. Г. Влияние структуры и свойств автолистовой стали на устойчивость деталей кузова автомобилей / В. Г. Гешелин, А. Ф. Осипов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – № 5. – С. 41–42.

Geshelin V. G., Osipov A. F. *Vliyaniye struktury i svoystv avtolistovoy stali na ustoychivost' detaley kuzova avtomobiley* [Influence of the structure and properties of autobody sheet steel on stability of the parts of car bodies]. *Metallurgical and mining industry*. 2000. No. 5. Pp. 41–42. (in Russian).

<http://www.metaljournal.com.ua/archive-2/>

3. Matlock D. K. Strengthening mechanism and their applications in extremely low C steels / D. K. Matlock, D. M. Bruce, J. G. Speer // *International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003)* [12–14 May, 2003]. Pp. 118–127. (in English).

<http://www.worldcat.org/search?q=bn:4930980364>

4. Bleck W. Effect of strain rate and temperature on the mechanical properties of LC and IF Steels / W. Bleck, P. Larour // *International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003)* [12–14 May, 2003]. Pp. 138–147. (in English).

<http://www.worldcat.org/search?q=bn:4930980364>

5. Work hardening behavior IF mild steel at high strain rate/ N. Kojima, Y. Nakazawa, N. Mizui // *International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003)* [12–14 May, 2003]. Pp. 163–166. (in English).

<http://www.worldcat.org/search?q=bn:4930980364>

6. Bleck W. Effect of strain rate and temperature on the mechanical properties of LC and IF Steels / W. Bleck, P. Larour // *International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003)* [12–14 May, 2003]. Pp. 138–147. (in English).

формирования близких по размерам кристаллитов и плотности дислокаций. Присадка кальция в сталь приводит к менее значительному изменению плотности дислокаций и размеров кристаллитов в сравнении со сталью 01ЮТА, что свидетельствует о разной способности к деформации исследованных сталей и, вероятно, лучшей штампуемости стали 01ЮТА\*. Повышенные прочностные свойства стали 01ЮТА\* обеспечивают повышенную надежность и долговечность изделий, изготовленных холодной объемной штамповкой или холодной высадкой в сравнении со сталью 01ЮТА.

<http://www.worldcat.org/search?q=bn:4930980364>

7. Kojima N. Workhardening behavior of IF mild steel at high strain rate / N. Kojima, Y. Nakazawa, N. Mizui // *International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003)* [12–14 May, 2003]. Pp. 163–166. (in English).

<http://www.worldcat.org/search?q=bn:4930980364>

8. Oudin A. Influence of grain size on the deformation behaviour of a Ti-IF steel / A. Oudin, M. R. Barnett, P. D. Hodgson // *International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003)* [12–14 May, 2003]. Pp. 329–336. (in English).

<http://www.worldcat.org/search?q=bn:4930980364>

9. Hutchinson B. Mechanisms of texture development in deep-drawable steels / B. Hutchinson, P. Bate // *International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003)* [12–14 May, 2003]. Pp. 337–346. (in English).

<http://www.worldcat.org/search?q=bn:4930980364>

10. Tsuji N. Microstructure, texture and mechanical properties of ultrafine grained IF steel / N. Tsuji, R. Ueki, Y. Minamino // *International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003)* [12–14 May, 2003]. Pp. 347–356. (in English).

<http://www.worldcat.org/search?q=bn:4930980364>

11. Куцова В. З. Анализ пространственного распределения ориентировки зерна в деформированной стали 01ЮТ / В. З. Куцова, А. Ю. Путники, Т. В. Котова, В. Г. Иванченко // *Сталь*. – 2011. – № 3. – С. 60–66.

Kutzova V. Z., Putnoki O. Yu., Kotova T. V., Ivanchenko V. G. *Analiz prostranstvennogo raspredeleniya orientirovki zerna v deformirovanniy stali 01IOT* [Analysis of the spatial distribution of the orientation of the grains in the deformed 01IOT steel]. *Steel*. 2011. No. 3. Pp. 60–66. (in Russian).

<http://www.twirpx.com/file/1689391/>

12. Куцова В. З. Електронномікроскопічні дослідження структури та властивості деформованої низьковуглецевої сталі / В. З. Куцова, О. Ю. Путники, В. Г. Иванченко, Т. В. Котова, О. О. Величко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2011. – № 24. – С. 218–224.

Kutzova V. Z., Putnoki O. Yu., Ivanchenko V. G., Kotova T. V., Vely'chko O. O. *Elektronnomikroskopichni doslidzhennya struktury ta vlasty'vosti deformovanoi niz'kovugletsevoyi stali* [Electron microscope studies of the structure and the properties of deformed low-carbon steel]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2011. No. 24. Pp. 218–224. (in Ukrainian).

<http://isi.gov.ua/sbornik-isi/%D0%B2%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA-24.html>

13. Карлікова Я. П. Поліпшення структури і механічних властивостей товстостісового прокату з безперервнолитої сталі комплексним мікролегуванням : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.01 «Металознавство і термічна обробка металів» / Я. П. Карлікова. – Маріуполь, 2010. – 18 с.

Karlikova Ya. P. *Polipshennya struktury i mekhanichnykh vlastyvostey товstolystovoho prokatu z bezperervnolytoyi stali kompleksnym mikroleguvannjam: avtoref. dys. na zdobuttya*

*nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.16.01 «Metaloznavstvo i termichna obrobka metaliv»* [Improving the structure and mechanical properties of the rolled plates from the continuously cast steel by complex microalloying]. Thesis for obtaining sciences. degree of the Sc. Candidate. Sciences specials. 05.16.01 "Physical metallurgy and heat treatment of metals". 2010. 18 p. (in Ukrainian).

<http://www.disslib.org/polipshennja-struktury-i-mekhanichnykh-vlastyvostej-tovstolystovoho-prokatu-z.html>

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Р. П. Дидыком (Украина); д-ром техн. наук, проф. Н. Е. Калининой (Украина)*

Поступила в редколлегию 01.12.2015

Принята в печать 08.12.2015