

### Литература

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
2. Влияние режима патентирования на структуру и механические свойства катанки из высокоуглеродистой стали /П. Функе, Г. Краутмахер, Р. Кольгрюбер // Черные металлы. – 1982. – № 2. – С.28–35.

УДК 621.771.23.01-97:620.18:669.15-194.018.26.001.5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УЛЬТРАНИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ АВТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ

А. Ю. Путники, В. Т. Тилик, В. З. Куцова\* ,  
Т. В. Котова\*, В. Г. Иванченко\*\*

*ОАО Запорожский МК «Запорожсталь»,*

*\*Национальная металлургическая академия Украины,*

*\*\*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ*

Несколько десятков лет считалось, что стальной листовой прокат толщиной менее 2 мм, используемый в автомобильной промышленности, целесообразно получать холодной прокаткой. Однако, в связи с тем, что на мировом рынке для одинаковых макропрофилеразмеров разница в цене горячекатаного и холоднокатаного листового проката достигает 25 %, даже частичное использование потребителем горячекатаного листового проката взамен холоднокатаного дает значительный экономический эффект. По этой причине в последние годы резко возросла потребность в горячекатаном тонколистовом прокате, используемом в том числе и взамен холоднокатаного [1].

В зависимости от способности к вытяжке холоднокатаных листов для глубокой вытяжки допускается различие в величине зерна, не превышающее двух-трех номеров. Неодинаковая величина зерен вызывает неравномерную деформацию металла при глубокой вытяжке, что может привести к образованию трещин.

При прокатке особотонких полос толщиной менее 2 мм из низкоуглеродистых сталей не удастся выдержать требуемый температурный режим окончания горячей прокатки. Для получения наилучшей микроструктуры необходимо, чтобы в конце прокатки металл находился в области температур однофазной аустенитной структуры (выше температуры  $A_{г3}$ ). При температуре выше  $A_{г3}$  структура металла после прокатки полос всегда однородна и состоит из зерен феррита 7–9-го номеров. Прокатку особотонких полос из низкоуглеродистой стали из-за больших тепловых потерь оканчивают в области двухфазной структуры аустенита и феррита ( $A_{г3} - A_{г1}$ ), что приводит к образованию структуры со смешанной величиной зерна, которая иногда находится в пределах 2–9-го номера [2].

Как показывает практика, решить эту проблему удастся за счет использования при прокатке особотонких полос ультранизкоуглеродистой

стали с содержанием углерода менее 0,02 % (IF-стали). Прокатку этих сталей можно заканчивать в области однофазной ферритной структуры металла, что оказывает благоприятное влияние на его микроструктуру [3].

По данным [4], качественные листы толщиной 1–1,5 мм для глубокой вытяжки при малом содержании С, Mn, Si в низкоуглеродистой стали можно получить со следующими свойствами:  $\sigma_T \leq 160$  МПа,  $\sigma_B \leq 280$  МПа,  $\delta > 45$  %.

На способность стали к глубокой вытяжке большое влияние оказывает отношение  $\sigma_T/\sigma_B$ . Низкое значение этого отношения говорит о том, что сталь имеет значительный ресурс пластичности и лист при штамповке будет хорошо пластически деформироваться. При  $\sigma_T/\sigma_B \approx 0,6$  можно рассчитывать на очень хорошую способность стали к глубокой вытяжке, на хорошую – при  $\sigma_T/\sigma_B = 0,65 \div 0,75$  и на плохую – при  $\sigma_T/\sigma_B > 0,75$ . На величину отношения в основном влияет предел текучести: чем меньше  $\sigma_T$ , тем меньше отношение  $\sigma_T/\sigma_B$  [4].

Наилучшие условия штампуемости, по данным [5], обеспечиваются в случае, если листы обладают следующими механическими свойствами: относительное удлинение не менее 40 %, твердость не выше 46 HRB ( 83 HRF ), отношение предела текучести к пределу прочности не более 0,65.

Уменьшение отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  при неизменном пределе прочности на практике достигается правильным выбором технологических параметров прокатки. На величину предела текучести оказывает влияние химический состав, структура стали и степень деформации. Чем ниже предел текучести, тем больший объем металла может участвовать в пластической деформации и тем менее вероятно образование местного утонения и разрыв металла при вытяжке. В ГОСТ 9045 установлена норма по пределу текучести для проката с категорией вытяжки ВОСВ (весьма особосложная вытяжка) 175-185 МПа. Поскольку взаимосвязь между какой-либо одной характеристикой механических свойств и штампуемостью листов установить трудно, оценку способности стали к вытяжке производят по совокупности свойств ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$  и HRB) [5].

За последнее десятилетие ведущие металлургические компании увеличивают производство стали, не содержащей примеси внедрения (IF-стали) в виде горячекатаного и холоднокатаного листа для автомобильной промышленности в рамках различных программ Международного института чугуна и стали ( IISI ): ULSAB и ULSAB–AVC. IF-стали высокопластичные, их структура стабилизирована микродобавками титана или/и ниобия, содержат сверхнизкое количество углерода ( $\leq 0,005$  %), который совместно с азотом полностью связан в карбиды, нитриды и карбонитриды. Прочность обусловлена упрочнением твердого раствора кремнием, марганцем и фосфором. Низкие величины отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  и высокая степень деформационного упрочнения этих сталей гарантируют высокие прочностные свойства и однородность толщины деталей кузова [6].

## 1. Материал и методика исследований

В работе исследовали карточки ультранизкоуглеродистой стали марок 01ЮТА и 01ЮТ толщиной 3,5 мм, химический состав которых приведен в таблице 1.

Экспериментальные исследования температурно-деформационных режимов, проведенные в лаборатории ИЧМ НАНУ, представлены в таблице 2.

Размер зерен феррита и толщину поверхностного мелкозернистого слоя измеряли вдоль и поперек направления прокатки, с помощью микроскопа Neophot-21 по методике количественной металлографии Салтыкова [7], а также с помощью компьютерного обеспечения – программы Adobe Photoshop CS2. Микротвердость феррита в центральных и поверхностных зонах определяли вдоль направления прокатки с помощью прибора ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 при нагрузке 20 Г и увеличении  $\times 485$ , как среднюю величину из 50 замеров. Точность замера диагоналей отпечатка составляет 0,3 % наименьшего деления шкалы микрометра. Твердость образцов определяли методом Роквелла по стандартной методике. Измерение механических свойств проводили на универсальной машине «Инстрон» в соответствии с ГОСТ 1497-84 на образцах, вырезанных вдоль направления прокатки.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные металлографического анализа позволили установить следующие закономерности структурообразования в стали в ходе проведенных экспериментов.

Микроструктура стали 01ЮТА, прокатанной по режиму с нагревом до 1000 °С за один проход в области однофазной аустенитной структуры со степенью деформации 36,8 %, исследованная вдоль направления прокатки (рис. 1), характеризуется зерном феррита № 6–3.

Встречаются зерна величиной 25–180 мкм. При исследовании образцов из этой же стали поперек направления прокатки (рис. 2), величина зерна феррита преимущественно № 5–3 (табл. 3), встречаются зерна размером 30–160 мкм. Некоторые зерна имеют вытянутую форму, соотношение осей 1:3 (1: 2).

Микроструктура стали 01ЮТА, прокатанная по режиму с нагревом до 1000 °С за два прохода: первый – в аустенитной, второй – в ферритной области температур со степенью деформации 64,3% исследованная вдоль (рис. 3) и поперек (рис. 4) направления прокатки, характеризуется наличием мелкозернистого слоя в поверхностной зоне полосы толщиной 100–250 мкм (табл. 3). Зерно в центральной зоне в основном № 6–4 при исследовании вдоль и № 5–3 при исследовании поперек направления прокатки. Встречаются зерна размером 5–180 мкм. Некоторые зерна неравноосные, вытянутой формы с соотношением  $N_{\text{зерна}} : L_{\text{зерна}} = 1 : 2$  (1 : 3).

Анализ рисунка 5 показал, что с ростом степени деформации образцов из стали 01ЮТА с содержанием углерода 0,002 % наблюдается увеличение предела текучести, предела прочности и твердости. Значения микротвердости феррита в центральных и поверхностных зонах полосы практически не изменяются. Значение отношения  $\sigma_{\tau}/\sigma_{\text{в}}$  составляет для стали 01ЮТА, прокатанной в один проход – 0,6, что свидетельствует об очень хорошей

Таблица 1

Химический состав листовой ультранизкоуглеродистой стали марок 01ЮТА, 01ЮТ, 01ЮТ\*, прокатанной из исходной заготовки толщиной 3,5 мм

Марка стали	Содержание элементов, % (по массе)											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N	Ca
01ЮТА	0,002	0,12	0,01	0,006	0,011	0,01	0,01	0,02	0,05	0,062	0,005	0,0002
01ЮТ	0,003	0,13	0,02	0,008	0,012	0,01	0,01	0,02	0,041	0,056	0,004	-
01ЮТ*	0,003	0,12	0,01	0,005	0,011	0,01	0,01	0,02	0,041	0,07	0,004	0,0003

\*- дополнительно содержит кальций

Таблица 2

Температурно-деформационные режимы прокатки ультранизкоуглеродистой листовой стали 01ЮТА, 01ЮТ и 01ЮТ\*

Марка стали	T <sub>нагр</sub>	T <sub>пр</sub>	h <sub>0</sub>	h <sub>1</sub>	Δh <sub>1</sub>	ε <sub>1</sub>	T <sub>2пр</sub>	h <sub>2</sub>	Δh <sub>2</sub>	ε <sub>2</sub>	ΣΔh	Σε
	°C		мм			%	°C	мм		%	мм	%
01ЮТА (1 проход)	1000	970-980	3,5	2,21	1,29	36,8	-	-	-	-	-	36,8
01ЮТ (1 проход)	1000	970-980	3,5	2,42	1,08	30,8	-	-	-	-	-	30,8
01ЮТ* (1 проход)	1000	970-980	3,5	2,37	1,13	32,3	-	-	-	-	-	32,3
01ЮТА (2 прохода)	1000	970-980	3,5	1,80	1,70	48,6	730-740	1,25	0,55	30,5	2,25	64,3
01ЮТ (2 прохода)	1000	970-980	3,5	1,80	1,70	48,6	730-740	1,3	0,5	27,8	2,2	62,9
01ЮТ* (2 прохода)	1000	970-980	3,5	1,80	1,70	48,6	730-740	1,3	0,5	27,8	2,2	62,9

Примечания:  $T_{\text{нагр}}$  – температура нагрева листовой стали;  $T_{1\text{пр}}$  – температура прокатки листовой стали в первом проходе;  $T_{2\text{пр}}$  – 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;  $\Sigma \Delta h$  – 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.

Таблица 3

Средняя величина ферритного зерна и толщина поверхностного мелкозернистого слоя при исследовании вдоль и поперек направления прокатки полос из ультранизкоуглеродистой стали

Марка стали, количество проходов при горячей прокатке	Суммарная степень деформации, %	Средний размер зерна феррита, мкм		Толщина мелкозернистого слоя, мкм		Конечная толщина полосы, мм
		вдоль направления прокатки	поперек направления прокатки	вдоль направления прокатки	поперек направления прокатки	
01ЮТА (1 проход)	36,8	25-180	30-160	-	-	2,21
01ЮТ (1 проход)	30,8	20-175	30-170	-	-	2,42
01ЮТ* (1 проход)	32,3	25-170	25-180	-	-	2,37
01ЮТА (2 прохода)	64,3	5-180	5-160	150-250	100-200	1,25
01ЮТ (2 прохода)	62,9	6-170	6-180	150-200	100-200	1,3
01ЮТ* (2 прохода)	62,9	5-180	5-155	100-200	200-250	1,3

способности к глубокой вытяжке, значение 0,8 для этой же стали, прокатанной за два прохода, свидетельствует о плохой способности.

Микроструктурные исследования стали 01ЮТ, прокатанной по режиму с нагревом до 1000 °С в один проход в аустенитной области со степенью деформации 30,8 %, исследованной вдоль (рис. 6) и поперек (рис. 7) направления прокатки, показали, что в готовом прокате образуется структура с зерном № 6–3 в центральной зоне полосы при исследовании вдоль и № 5–3 при исследовании поперек направления прокатки (табл. 3). Встречаются зерна размером 20–170 мкм. Форма некоторых зерен вытянутая, соотношение осей составляет 1 : 2 (1 : 1,5).

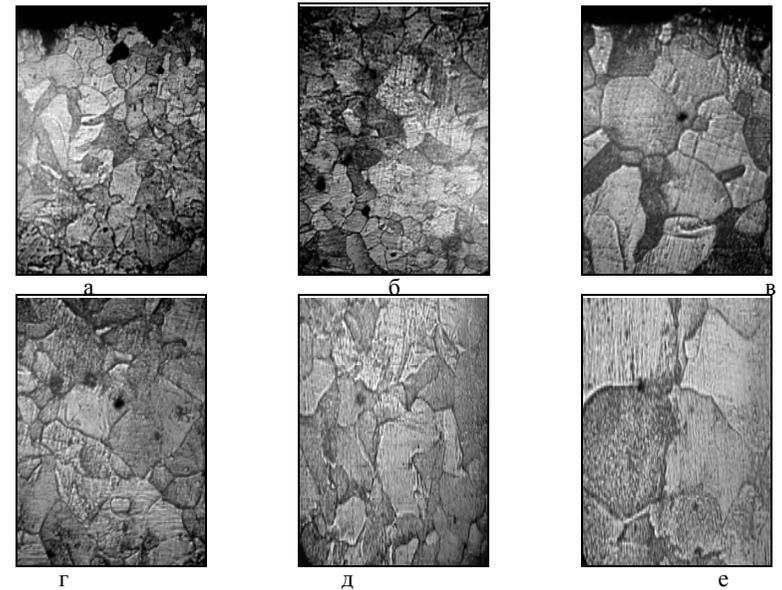


Рис. 1. Микроструктура стали 01ЮТ, прокатанной за один проход в аустенитной области, вдоль направления прокатки в поверхностной ( а, в ) и центральной ( б, г ) зонах полосы; а, б – х 100, в, г – х 200, д – х 400, е – х 1000.

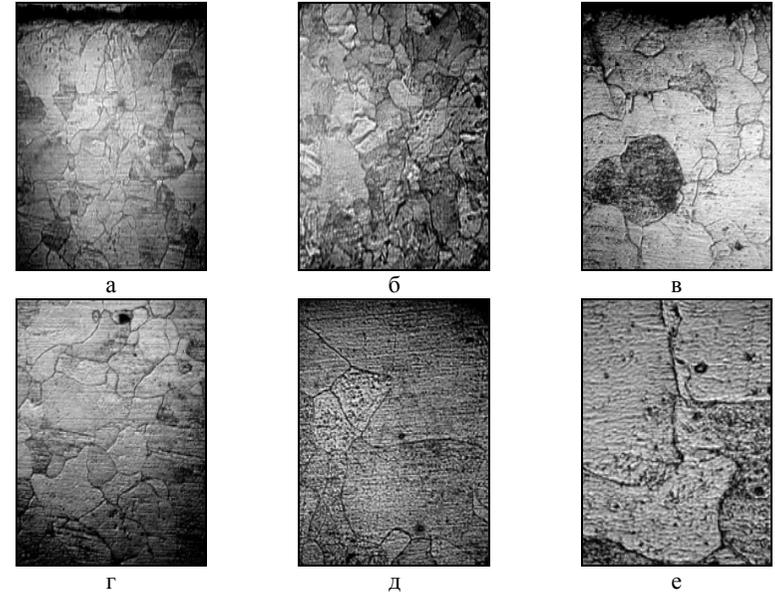


Рис. 2. Микроструктура стали 01ЮТА, прокатанной за один проход в аустенитной области, поперек направления прокатки в поверхностной ( а, в ) и центральной ( б, г ) зонах полос; а, б – х 100, в, г – х 200, д – х 400, е – х 1000.

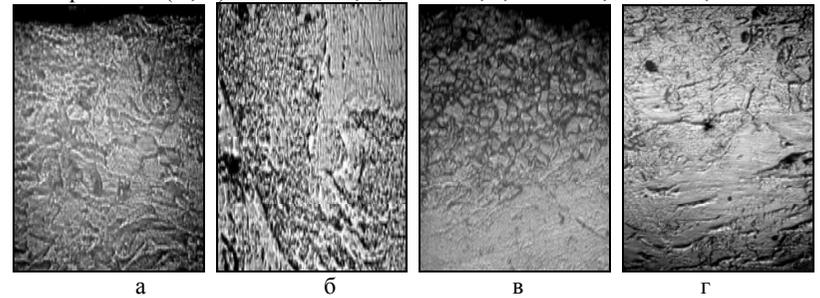


Рис. 3. Микроструктура стали 01ЮТА, прокатанной за два прохода со степенью деформации 64,3 %, вдоль направления прокатки в поверхностной (а, в) и в центральной (б, г) зонах полос; а – х 100, б – х 1000, в, г – х 200.

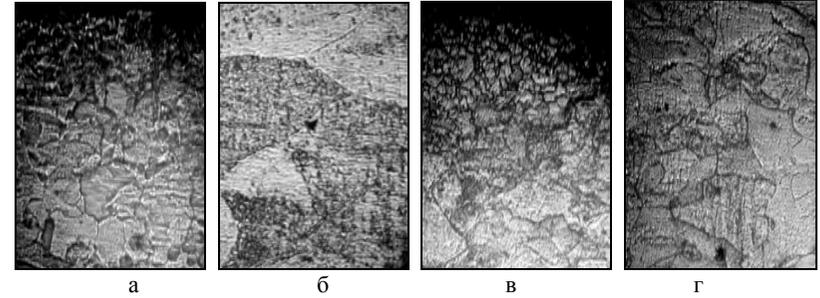


Рис. 4. Микроструктуры стали 01ЮТА, прокатанной за два прохода со степенью деформации 64,3 %, поперек направления прокатки в поверхностной (а, в) и в центральной (б, г) зонах полос; а – х 100, б – х 1000, в, г – х 200.

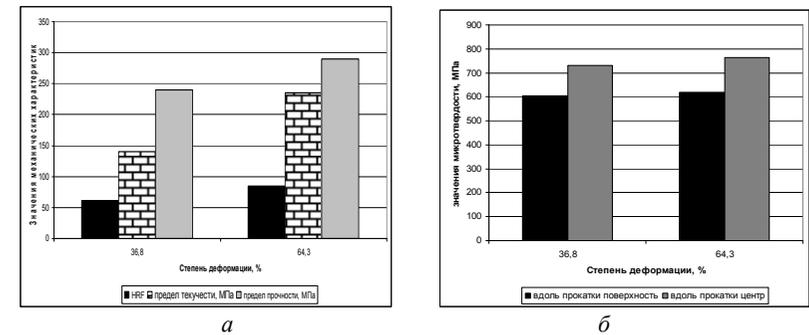


Рис. 5. Зависимость значений предела прочности, предела текучести, твердости (а), микротвердости (б) от степени деформации образцов из стали 01ЮТА, вырезанных вдоль направления прокатки.

Микроструктура стали 01ЮТ, прокатанной по режиму с нагревом до 1000 °С за два прохода: первый – в аустенитной области, второй – в ферритной области температур со степенью деформации 62,9 %, исследованная вдоль (рис. 8) и поперек (рис. 9) направления прокатки, характеризуется наличием мелкозернистого слоя толщиной 100–200 мкм в поверхностных участках полосы (табл. 3).

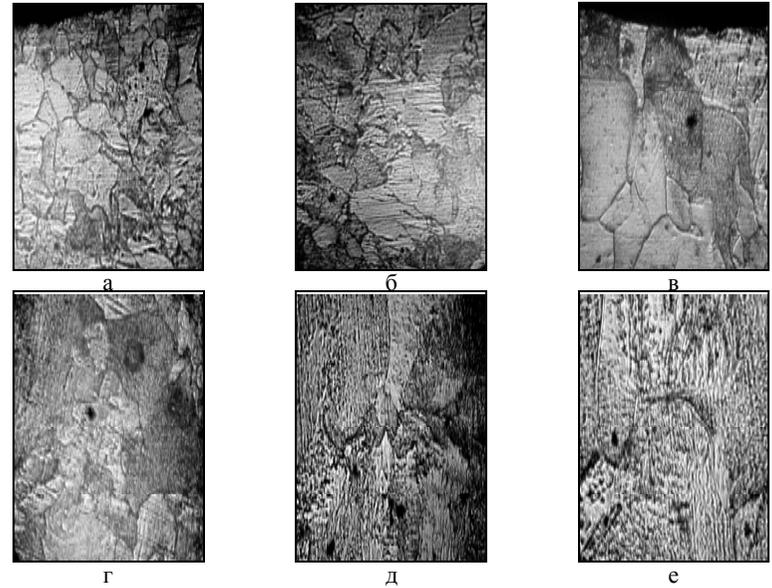


Рис. 6. Микроструктура стали 01ЮТ, прокатанной в один проход в аустенитной области со степенью деформации 30,8 %, вдоль направления прокатки в поверхностной (а, в) и в центральной (б,г, д, е) зонах полос; а, б – х 100, в, г – х 200, д – х 500, е – х 1000.

При исследовании вдоль направления прокатки в центральной зоне зерно преимущественно № 6–3, при исследовании поперек – № 6–3. Встречаются зерна размером 5–180 мкм. Форма зерен в основном вытянутая, соотношение осей составляет от 1 : 3,5 до 1 : 2 (1 : 1,5).

Анализ рисунка 10 показывает, что с ростом степени деформации образцов из стали 01ЮТ наблюдается увеличение значений твердости, предела текучести, а показатели относительного удлинения снижаются ~ в 2 раза. Наблюдается снижение значений микротвердости феррита в центральных и поверхностных зонах полосы. Значение отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  составляет для стали 01ЮТ, прокатанной в один проход – 0,6, что свидетельствует об очень хорошей способности к глубокой вытяжке, значение 0,8 для этой же стали, прокатанной за два прохода, свидетельствует о плохой способности.

Таким образом, с увеличением степени деформации возникает зернограничное упрочнение ввиду скопления дислокаций по границам зерен и протекания явлений полигонизации. В результате упрочнения происходит повышение прочностных свойств и снижение пластических характеристик. Это приводит к снижению способности стали к глубокой вытяжке.

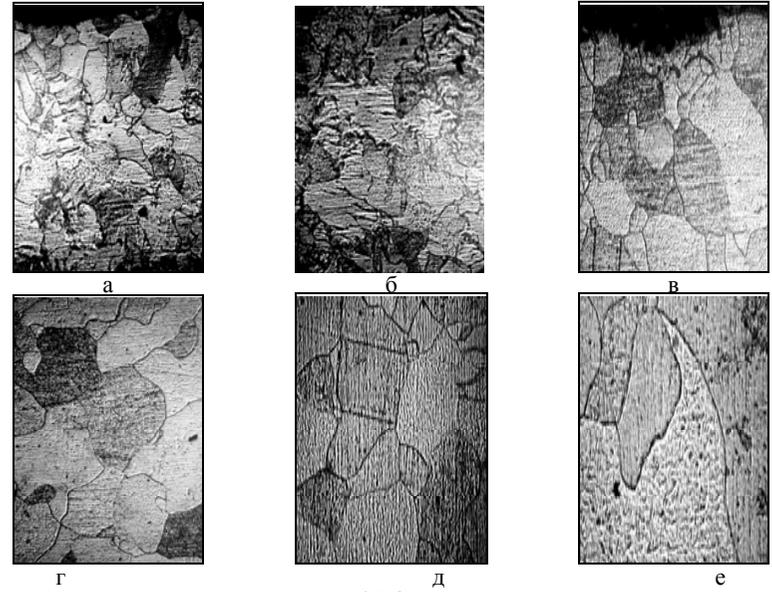


Рис. 7. Микроструктура стали 01ЮТ, прокатанной в один проход в аустенитной области со степенью деформации 30,8%, поперек направления прокатки в поверхностной (а, в) и в центральной (б, г, д, е) зонах полос; а, б – х 100, в, г – х 200, д – х 400, е – х 1000.

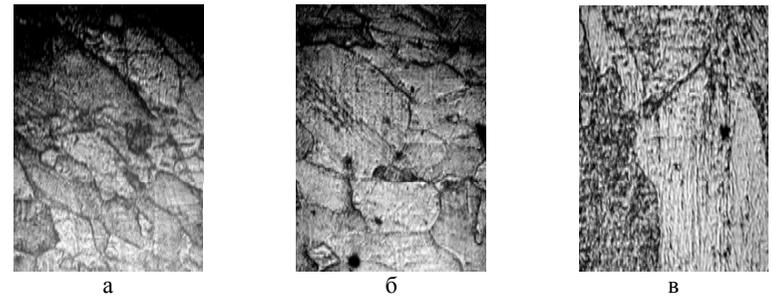


Рис. 8. Микроструктуры стали 01ЮТ, прокатанной за два прохода со степенью деформации 62,9 %, вдоль направления прокатки в поверхностной (а) и в центральной (б, в) зонах полос; а, б – х 200, в – х 1000.

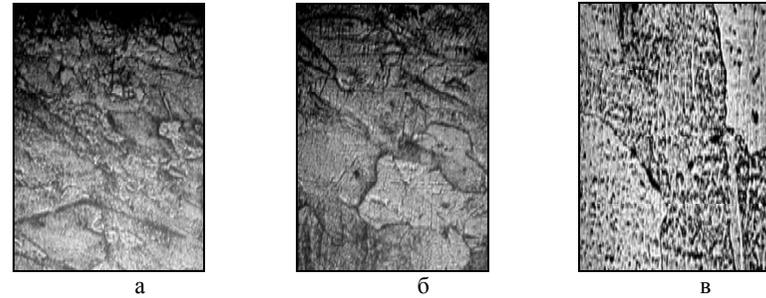


Рис. 9. Микроструктура стали 01ЮТ, прокатанной за два прохода со степенью деформации 62,9 %, поперек направления прокатки в поверхностной (а) и в центральной (б, в) зонах полос; а, б – х 200, в – х 1000.

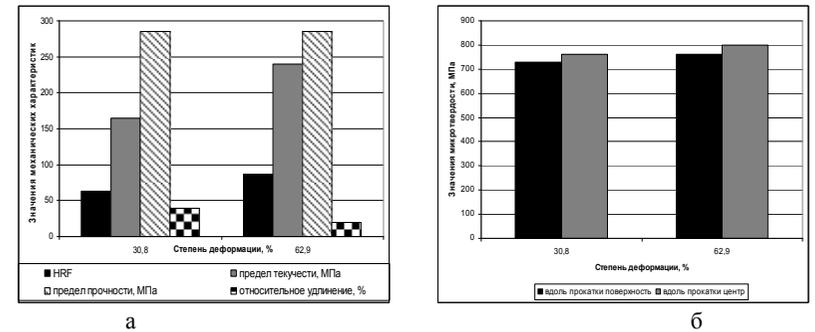


Рис. 10. Зависимость значений предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, твердости (а), микротвердости (б) от степени деформации образцов из стали 01ЮТ, вырезанных вдоль направления прокатки.

Микроструктурные исследования стали 01ЮТ\*, прокатанной по режиму с нагревом до 1000 °С в один проход в аустенитной области со степенью деформации 32,3 %, исследованной вдоль (рис. 11) и поперек (рис. 12) направления прокатки, показали, что в результате формируется зерно № 5–3 по всему сечению полосы (табл. 3). Встречаются зерна размером 5–180 мкм. Некоторые зерна имеют вытянутую форму с соотношением осей 1 : 2,5 (1 : 1,5).

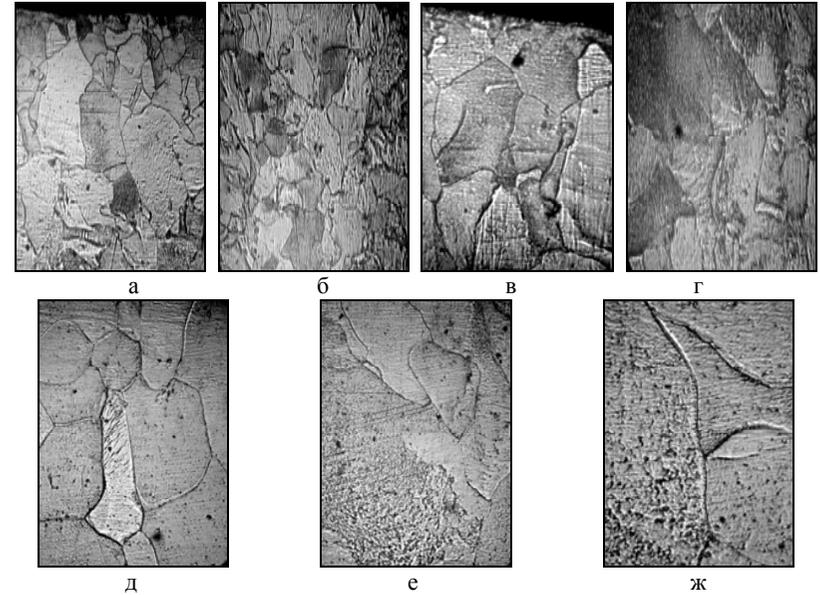


Рис. 11. Микроструктура стали 01ЮТ\*, прокатанной в один проход в аустенитной области со степенью деформации 32,3 %, вдоль направления прокатки в поверхностной (а, в) и в центральной (б, г, д, е, ж) зонах полос; а, б – х 100, в, г – х 200, д – х 400, е – х 500, ж – х 1000.

Микроструктура стали 01ЮТ\*, прокатанной по режиму с нагревом до 1000 °С за два прохода: первый – в аустенитной области, второй – в ферритной области температур со степенью деформации 62,9 % исследованная вдоль (рис. 13) и поперек (рис. 14) направления прокатки, характеризуется наличием мелкозернистого слоя толщиной 100–250 мкм на некоторых участках полосы. Ферритное зерно в центральной зоне полосы преимущественно № 6–4 при исследовании вдоль и № 6–3 при исследовании поперек направления прокатки. Встречаются зерна размером 5–180 мкм. В основном зерна имеют вытянутую форму с соотношением осей 1 : 3,5 (1:2).

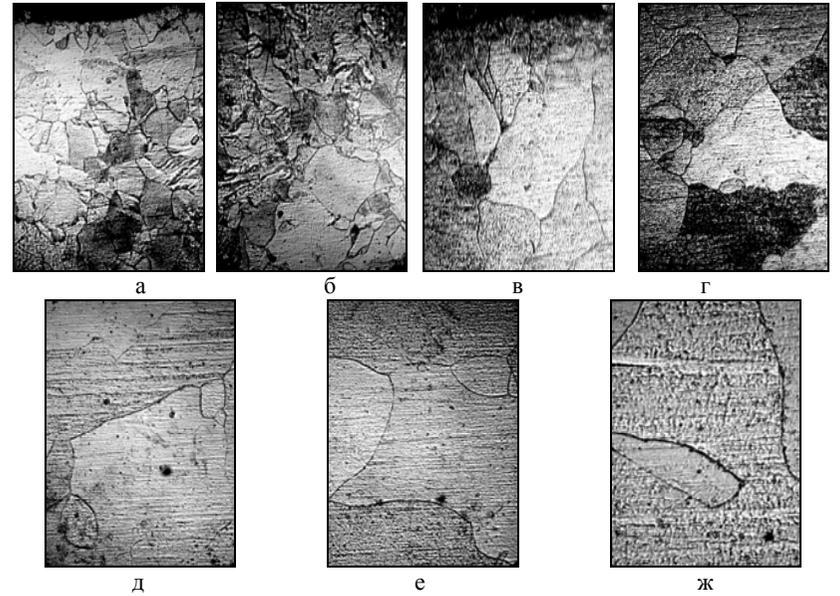


Рис. 12. Микроструктура стали 01ЮТ, прокатанной в один проход в аустенитной области со степенью деформации 32,3 %, поперек направления прокатки в поверхностной ( а, в ) и в центральной ( б, г, д, е, ж ) зонах полос; а, б – х 100, в, г – х 200, д – х 400, е – х 500, ж – х 1000.

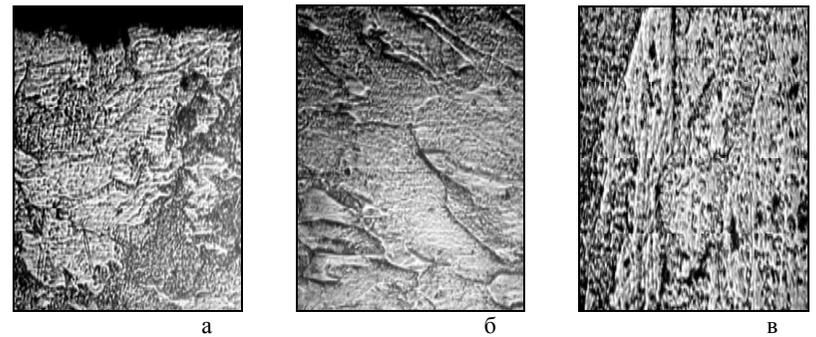


Рис. 13. Микроструктура стали 01ЮТ\*, прокатанной за два прохода со степенью деформации 62,9 %, вдоль направления прокатки в поверхностной (а) и в центральной (б, в) зонах полос; а, б – х 200, д – х 1000.

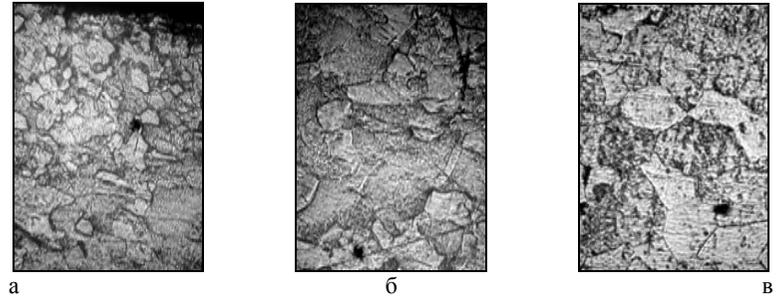


Рис. 14. Микроструктура стали 01ЮТ\*, прокатанной за два прохода со степенью деформации 62,9 %, поперек направления прокатки в поверхностной (а) и в центральной (б, в) зонах полос; а, б – х 200, д – х 1000.

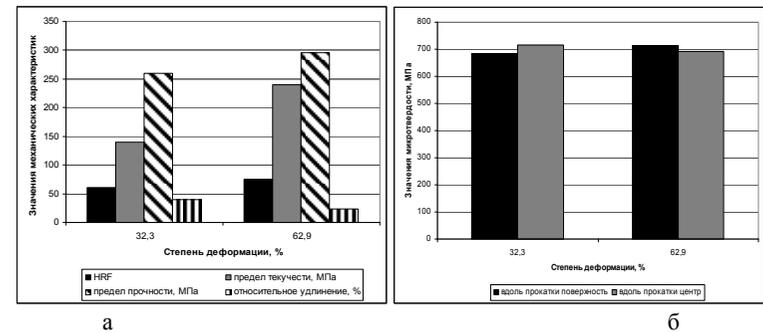


Рис. 15. Зависимость значений предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, твердости (а), микротвердости (б) от степени деформации образцов из стали 01ЮТ\*, исследованных вдоль направления прокатки.

Анализ рисунка 15 показал, что значения твердости, предела прочности, предела текучести с ростом степени деформации образцов из стали 01ЮТ\* увеличиваются, а показатели относительного удлинения снижаются. Наблюдается незначительное снижение значений микротвердости феррита в центральных участках полосы. Значение отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  составляет для стали 01ЮТ\*, прокатанной в один проход – 0,5, что свидетельствует об очень хорошей способности к глубокой вытяжке, значение 0,8 для этой же стали, прокатанной за два прохода, свидетельствует о снижении способности к вытяжке. В образце из стали 01ЮТ\*, прокатанной за один проход со степенью деформации 32,3 %, наблюдается сочетание хороших пластических свойств ( $\sigma_T/\sigma_B = 0,5$ ) при  $\delta = 39$  %.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при обработке ультранизкоуглеродистой стали марок 01ЮТА, 01ЮТ и 01ЮТ\* по всем исследованным режимам формируется ферритная структура с равноосными зёрнами и с зёрнами вытянутой формы. В образцах всех исследованных марок сталей, прокатанных за два прохода, в участках поверхностной зоны обнаружен мелкозернистый слой, толщина которого достигает 1/5–1/6 толщины полосы с каждой стороны.

2. С увеличением степени деформации предел текучести образцов всех исследованных марок сталей возрастает ~ в 1,5 раза.

3. Значения относительного удлинения образцов из сталей 01ЮТ и 01ЮТ\* с увеличением степени деформации снижаются.

4. С увеличением степени деформации значения твердости и предела прочности ( $\sigma_n$ ) образцов стали 01ЮТА и 01ЮТ\* возрастают.

5. С увеличением степени деформации и возникающим зернограницным упрочнением происходит повышение прочностных свойств и снижение пластических характеристик, а следовательно, и способности к глубокой вытяжке.

## Литература

1. Руофф Е. Т. Новые технологии производства листовой стали и их влияние на станы холодной прокатки полосы и ее заказчиков // Черные металлы. – 2000. – № 10. – С. 44–48.

2. Исследование влияния ферритной прокатки на микроструктуру и механические свойства особотонкой листовой низкоуглеродистой стали / В. Г. Иванченко, С.Д. Адамский, В. Т. Тилик [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2000. – Вып. 7. – С. 67–69.

3. Дегнер М. Разработки в области производства сверхтонкой горячекатаной полосы / М. Дегнер, Т. Хеллер, П. Тезе // Черные металлы. – 2001. – № 3. – С. 24–26.

4. Дедек Вл. Полосовая сталь для глубокой вытяжки // М.: Металлургия. – 1970. – 208 с.

5. Прокатка автолистовой стали / Ф. А. Ксензук, Н. А. Трощенко, А. П. Чекмарев, М.М. Сафьян // М.: Металлургия. – 1969. – 296 с.

6. Родионова И. Технологические аспекты производства сталей для автомобилестроения / И. Родионова, Г. Филиппов // Национальная металлургия. – 2004. – № 2. – С. 93–97.

7. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия. – 1970. – 376 с.