

**В.Ю.Полужков, А.М.Нестеренко, О.П.Юшкевич\***

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНО–ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
НА ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ПОДКАТА ИЗ СТАЛИ 35.**

*Институт черной металлургии НАН Украины, г. Днепропетровск  
\*Днепропетровская национальная металлургическая академия Украины*

Установлено, что для гарантированного обеспечения требуемого по ГОСТ 10702 уровня механических свойств проката из среднеуглеродистой стали с пластинчатой морфологией цементита в перлите может варьироваться в широком интервале – от ~17 до 40%, однако обжатие при калибровке после рекристаллизационно–сфероидизирующего отжига при субкритической температуре должно находиться на уровне, не превышающем  $\varepsilon=5-7\%$ .

**Современное состояние вопроса.** Высокая производительность современных линий по массовому производству крепежных (болты, винты, гайки, шпильки и т.д.) и машиностроительных деталей методами холодной объемной штамповки (ХОШ) может быть обеспечена только при соответствующем комплексе структурных параметров и уровне механических свойств используемого для ХОШ подката и калиброванной стали [1,2]. При производстве высококачественной калиброванной стали указанного назначения на метизных предприятиях применяют механико–термическую обработку (МТО), включающую операции волочения и рекристаллизационно–сфероидизирующего отжига. Несмотря на значительное количество работ по данной проблематике, многие вопросы, касающиеся, в частности, особенностей взаимосвязи параметров зеренной и тонкой кристаллической структуры феррита, его текстуры с механическими и потребительскими свойствами калиброванной стали, которые сформировались при разных режимах МТО, практически не рассматривались. Учитывая, что эти факторы во многом определяют способность стали к ХОШ, проведенное в составе настоящей работе исследование представляется актуальным.

**Изложение основных материалов исследования.** Исследовали подкат и калиброванную сталь из стали марки 35 по ГОСТ 10702. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе «Аксиоверт – 200 М МАТ». Параметры тонкой структуры феррита в центральных зонах поперечных сечений образцов подката и калиброванной стали изучали на рентгеновском дифрактометре ДРОН – УМ1 в  $FeK\alpha$  – излучении с использованием метода аппроксимации [3]. Текстуру анализировали на тех же образцах методом Шульца [4] на рентгеновском дифрактометре ДРОН – 1,0 ( $FeK\alpha$  – излучение).

После травления и подготовки поверхности подкат из стали обрабатывали по следующим режимам: 1 – волочение → отжиг; 2 – волочение → отжиг → калибровка. В исходном состоянии структура подката феррито–перлитная (рис. 1а). Размер зерна феррита – №10 по ГОСТ 5639. Морфология цементита в перлите – пластинчатая.

В случае режима 1 подкат диаметром 15мм волочили с обжатиями 17% (за один проход) и 35% (за два прохода – в одном и во взаимно противоположном направлениях). Отжиг деформированной стали производили при субкритической температуре 700<sup>0</sup>С в течение 3,5 и 12 часов.

Волочение подката с обжатием 17% приводит к существенному повышению его прочностных свойств и к уменьшению пластичности (вариант 2 – табл.). Отжиг при 700<sup>0</sup>С в течение 3,5ч в результате развитие процессов рекристаллизации феррита и частичной (без рассредоточения по объему ферритной матрицы) сфероидизации цементита перлита (рис.1б) способствует повышению пластичности, получению благоприятного для ХОШ уровня  $\sigma_T / \sigma_B$  (вариант 3 – табл.). Однако значение  $\sigma_B$  в этом случае остается по–прежнему высоким (табл.), что осложняет проведение процесса калибровки стали. При более длительном отжиге достигается приемлемый комплекс механических свойств (вариант 4 – табл.). Увеличение обжатия при волочении до 35% еще в большей мере снижает показатели пластичности (варианты 5,6 – табл.). Следует отметить, что прочностные свойства стали, деформированной реверсивно, заметно выше, чем в стали, деформированной однонаправленно. Соответственно выше и уровень «запасенной энергии», определяющей развитие релаксационных процессов, в том числе и рекристаллизации [5], о чем свидетельствует высокое значение микронапряжений второго рода решетки феррита  $\Delta a/a$  в реверсивно деформированной стали (вариант 6 – табл.). Поэтому в реверсивно деформированной стали при отжиге в течение 3,5ч в результате более интенсивного развития процессов рекристаллизации феррита и сфероидизации цементита перлита формируется мелкозернистая ферритная структура (№11 вместо №10 для стали, деформированной однонаправленно) с наиболее совершенной внутризеренной субструктурой (наиболее низким уровнем  $\Delta a/a$ ), осуществляется полная сфероидизация цементита (рис.1,в) и достигается наиболее благоприятный в плане ХОШ комплекс механических свойств и уровень значения  $\sigma_T / \sigma_B$  (вариант 8 – табл.).

Отжиг при 700<sup>0</sup>С в течение 12ч деформированной с обжатием 35% стали приводит к рассредоточению частиц цементита в ферритной матрице и к укрупнению зерен феррита в 1,5 раза. Это обуславливает уменьшение значений  $\sigma_B$  и повышение показателей пластичности стали (варианты 9,10 – табл.). Однако значения отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  при этом увеличиваются, что не соответствует требованиям ХОШ ( $\sigma_T/\sigma_B \leq 0,65$ ) для деталей сложной конфигурации [6].

В случае режима 2 образцы подката диаметром 8мм подвергали волочению с обжатиями 17 и 35% за один проход, отжигу при 700<sup>0</sup>С в течение

3,5 ч и последующей калибровке с обжатиями от 3 до 40%. Структура стали после волочения с обжатиями 17 и 35% и последующего отжига аналогична таковой для подката диаметром 15мм, обработанного аналогичным образом (рис.1б,в). В стали с частично сфероидизированным цементитом (обжатие 17%) размер зерна феррита составляет 9–10мкм (№10), а в полностью сфероидизированной стали (обжатие 35%) зерно феррита мельче 6–7мкм (№11). Такое различие структуры определяет особенности ее упрочнения при калибровке. Сталь с более мелким зерном (обжатие 35%) при калибровке упрочняется более интенсивно, о чем свидетельствует более высокий уровень прироста значений уширения рентгеновской интерференции  $\beta_{(220)}$  (рис.2,а) и предела текучести, а также более выраженное снижение  $\delta_5$  (рис.3).

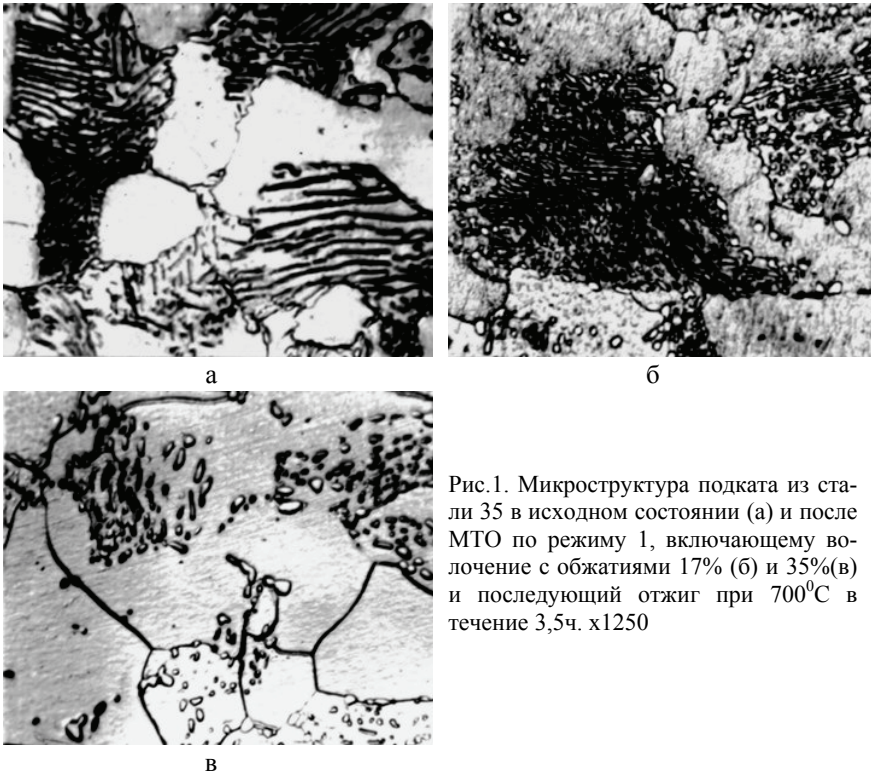


Рис.1. Микроструктура подката из стали 35 в исходном состоянии (а) и после МТО по режиму 1, включающему волочение с обжатиями 17% (б) и 35%(в) и последующий отжиг при 700°С в течение 3,5ч. x1250

На кривой зависимости уширения  $\beta_{(220)}$  от степени обжатия  $\epsilon$  при калибровке в стали с более крупным зерном феррита перегиб, вызванный формированием внутризеренной ячеистой субструктуры наблюдается при обжатиях 10% (начало) – 22% (окончание) (рис.2,а).

Таблица. Механические свойства и значения уровня микронапряжений  $\Delta a/a$  в феррите подката из стали 35 после обработки по разным вариантам режима 1.

№ варианта	Вид обработки	Механические свойства					Значение $\Delta a/a \cdot 10^{-3}$
		$\sigma_{\Gamma},$ Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{В}},$ Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\Gamma}/\sigma_{\text{В}}$	$\delta_5,$ %	$\Psi,$ %	
1	Исходное состояние	390	600	0,65	27,5	45,7	0,61
2	Обжатие при волочении 17%	590	677	0,87	15,2	46,8	—
3	Обжатие 17% + отжиг (3,5ч)	343	545	0,63	28,8	64,3	—
4	Обжатие 17% + отжиг (12ч)	314	476	0,66	34,4	68,0	—
5	Обжатие 35% (→)*	673	780	0,86	8,6	34,8	0,81
6	Обжатие 35% (↔)*	708	880	0,80	8,4	33,8	1,37
7	Обжатие 35%(→)+отжиг (3,5ч)	323	496	0,65	36,2	71,0	0,47
8	Обжатие 35%(↔)+отжиг (3,5ч)	311	494	0,63	35,9	72,0	0,21
9	Обжатие 35%(→)+отжиг (12ч)	319	458	0,70	38,3	70,9	0,63
10	Обжатие 35%(↔)+отжиг (12ч)	336	460	0,73	39,5	71,5	0,58

\* Примечание. Волочение за 2 прохода (→) – однонаправленное, (↔) – реверсивное

Аналогичный перегиб на аналогичной кривой стали с мелким зерном феррита наблюдается при значительно меньших обжатиях и в более узком их интервале  $\varepsilon = 3\text{--}5\%$  (рис.2,а). Поскольку распространение дислокаций от зерна к зерну в поликристаллах облегчается при уменьшении размера зерен [7], формирование ячеистой субструктуры в стали с более мелким зерном феррита и полностью сфероидизированным цементитом происходит при гораздо меньших обжатиях ( $\varepsilon = 3\text{--}5\%$ ), а интенсивность упрочнения при повышении обжатия до  $\varepsilon = 30\%$  становится более высокой, чем в стали с укрупненным ферритным зерном. При обжатии, близком к  $\varepsilon = 40\%$ , картина упрочнения меняется: более интенсивно упрочняется сталь с укрупненным ферритным зерном (рис.2,а) вследствие начала деформации феррита в участках с частично сфероидизированным цементитом.

Исходная (после отжига) степень текстурованности  $\Phi_{\langle 110 \rangle}$  стали, определяемая объемной долей зерен феррита, ориентированных направлениями  $\langle 110 \rangle$  его ОЦК–решетки параллельно оси проката, невелика:  $\sim 20\%$  (рис.2,б). По мере увеличения обжатия при калибровке значение  $\Phi_{\langle 110 \rangle}$  возрастает (рис.2,б). В интервалах обжатий  $\varepsilon = 3\text{--}10\%$  для мелкозернистой стали и  $\varepsilon = 20\text{--}40\%$  для стали с укрупненным ферритным зерном на кривых зависимости  $\Phi_{\langle 110 \rangle}$  от обжатия наблюдаются перегибы, появление которых вызвано отклонением оси сформировавшейся при рекристаллизации аксиальной текстуры  $\langle 110 \rangle$  от оси проката. Действительно, из прямой полюсной фигуры (110) образца проката с мелкозернистой ферритной структурой, обработанного по режиму 2с обжатием при калибровке 10%, следует, что центры концентрических окружностей, характеризующие области повышенной плотности аксиальной текстуры  $\langle 110 \rangle$ , смещены относительно центра стереографической проекции на угол  $3,6^\circ$ . Такого рода отклонение оси аксиальной текстуры  $\langle 110 \rangle$  от центральной оси образца характерно и для стали с укрупненным ферритным зерном в случае обжатий при калибровке, составляющих  $\varepsilon = 20\text{--}40\%$ . Геометрическая несоосность сформировавшейся текстуры и калиброванного проката приводит к неравномерному развитию пластического течения металла в симметричных относительно оси проката позициях в процессе ХОШ, что по аналогии с приведенными в [7] примерами может приводить к образованию различного рода дефектов при осадке проката и в изготавливаемых методом ХОШ изделиях. Поэтому для операций осадки с высокими степенями деформации и для ХОШ изделий сложной конфигурации наиболее предпочтительным является использование металла с низкой текстурованностью, в котором ось аксиальной текстуры  $\langle 110 \rangle$  расположена параллельно оси проката, что наряду с равномерностью структуры вдоль различных направлений обеспечивает благоприятную для ХОШ изотропность свойств исследованного проката из стали 35.

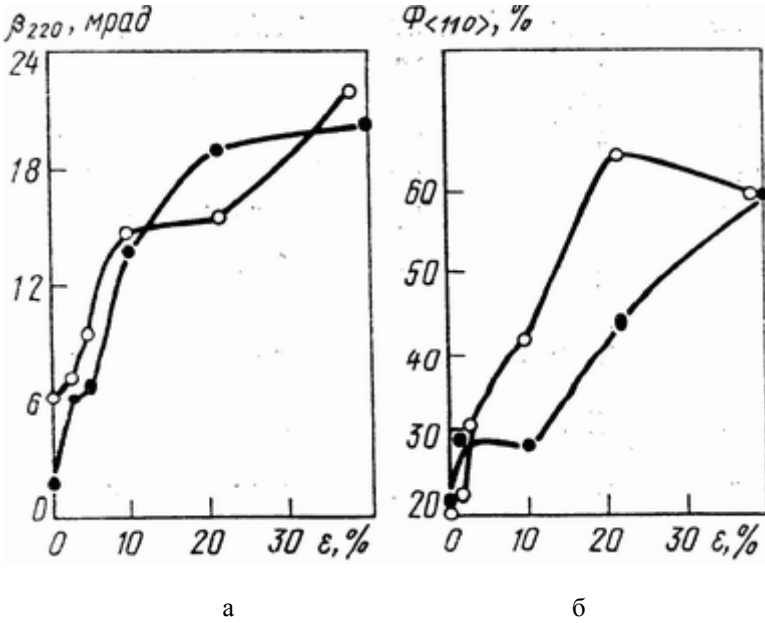


Рис.2. Характер изменения уширения рентгеновской интерференции (220)  $\beta_{(220)}$  (а) и объемной доли аксиальной ориентировки  $\Phi_{\langle 110 \rangle}$  текстуры (б) в зависимости от степени обжатия  $\epsilon$  при калибровке (МТО по режиму 2 с обжатием при волочении перед отжигом 17% (○) и 35% (●)).

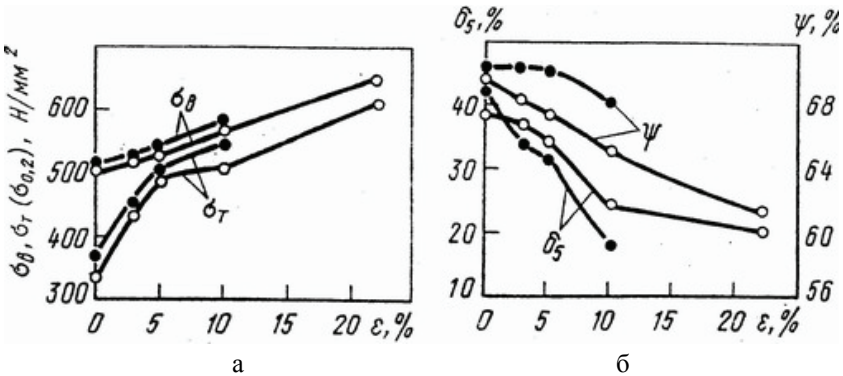


Рис.3. Изменение механических свойств проката из стали 35 в зависимости от степени обжатия  $\epsilon$  при калибровке в цикле МТО по режиму 2 (обозначения те же, что и на рис. 2).

Обобщение полученных данных позволяет заключить, что для достижения в калиброванной стали 35 при МТО оптимальных в плане сложной ХОШ механических свойств, параметров структуры и их изотропности обжатие при калибровке должно составлять  $\varepsilon = 5\text{--}7\%$ .

Результаты проведенных исследований использованы для разработки технологии производства нагартованной калиброванной стали для сложной ХОШ, обеспечивающей гарантированное выполнение требований ГОСТ 10702 ( $\sigma_B \leq 590 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\delta_5 \geq 5\%$ ;  $\Psi \geq 40\%$ ), которая предусматривает применение в составе МТО волочения ускоренно охлажденного подката из среднеуглеродистой стали 35 с обжатием 20–40%, рекристаллизационно–сфероидизирующего отжига при субкритической температуре в течение 2–5ч и калибровки с обжатием  $\varepsilon = 5\text{--}7\%$ . Применение разработанной технологии на метизных предприятиях позволило обеспечить требуемые показатели качества калиброванной стали и сократить расходы по ее перелу в цикле МТО в результате исключения такой технологической операции, как сфероидизирующий отжиг перед волочением.

**Выводы.** Установлено, что для гарантированного обеспечения требуемого по ГОСТ 10702 уровня механических свойств, благоприятных для сложной ХОШ параметров структуры и их изотропности в калиброванной стали обжатие при волочении в цикле МТО проката из среднеуглеродистой ста–ли с пластинчатой морфологией цементита в перлите может варьироваться в широких пределах – от ~17 до 40%, однако обжатие при калибровке после рекристаллизационно–сфероидизирующего отжига при субкритической температуре должно находиться на уровне, не превыша–ющем  $\varepsilon=5\text{--}7\%$ .

1. *Смольянинов Н.А., Шушанов И.Г.* Технология изготовления металла для холодной высадки. //– Сталь – 1959. – № 12. – С.1136–1140.
2. *Металловедение и термическая обработка стали.* – Справ. изд. – Т.Ш. – Термическая обработка металлопродукции. / Под ред Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г. – М.: Металлургия, 1983. – 216с.
3. *Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н.* Рентгенографический и электроннооптический анализ. – М.: МИСиС, 1994. – 328с.
4. *Бородкина М.М., Спектор Э.Н.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 272с.
5. *Горелик С.С.* Рекристаллизация металлов и сплавов – М.: Металлургия, 1978. – 568с.
6. *Билигман И.* Высадка и штамповка. – М.: Машгиз, 1960. – 467с.
7. *Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К.* Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 583с.

*Статья рекомендована к печати докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко*