

ИСО 7902-2:2003 (ГОСТ ИСО 7902-2-2001, IDT). – [Чинний від 01.07.2004]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 28 с. – (Національний стандарт України).

Gidrodynamichni radial'ni pidshypnyky kovzannja, jaki pracjujut' v stacionarnomu rezhymi. Kruglocylindrychni pidshypnyky. Part 2. Funkcii', vykorystovuvani dlja rozrahunku: DSTU GOST YSO 7902-2:2003 (GOST YSO 7902-2-2001, IDT). [Chynnyj vid 01.07.2004]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukraїny, 2008, 28 p. (Nacional'nyj standart Ukraїny).

10. Yershov S. The Analysis on Hydrodynamic Bearings Performance in High-Speed Modules of Wire Rolling Mills / Serhii Yershov, Volodymyr Samokhval, Serhii Havrylin, Yurii Antonov, Maksym Kutvitski // Metallurgical and Mining Industry. – 2017. – № 7. – P. 36–45.

**Purpose.** Analysis of the degree of influence of working parameters of hydrodynamic bearings of high-speed finishing blocks on accuracy of wire rod in the conditions of existing, technologically determined, changes in rolling parameters.

**Methodology.** The basic parameter of the operation of the hydrodynamic bearings, which was used for analysis, served as the calculated minimum thickness of

the lubricant film. The calculations of this parameter were performed according to the standard method for adjusting the conditions of the modules and for the conditions of the stable operation of the unit when rolling rods with a diameter of 5.5 mm from low-carbon steel. Technological parameters, such as rolling force and others, were calculated according to the method of V. K. Smirnov.

**Findings** calculations show that, for the existent technological parameters of rolling, the constructive parameters of the bearings of the main supports modules determining the formation of relatively thick lubricant films. Taking into account the speed difference in the adjusting and the steady operation of the block modules, there is a significant difference in the thickness of the lubricating film, especially for the last modules. In particular, for modules 8 and 9, the difference in gaps in adjustment and under steady operation is an average of 0.16 mm, and for module 10 it reaches 0.21 mm.

**Practical value.** Addressing the identified gaps difference when setting up and steady operation, due to different thickness of oil films, will accurately maintain process variables and provide increased precision rolling.

**Key words:** hydrodynamic journal bearing, oil film thickness, gap between rolls

Рекомендована к публикации  
д. т. н. В. Ф. Балакиным

Поступила 13.03.2018



УДК 621.771.23

Наука

Я. Д. Василев /д. т. н./

Национальная металлургическая академия  
Украины, г. Днепро, Украина

## Исследование взаимосвязи между толщиной и пределом текучести горячекатаного подката и механическими свойствами холоднокатаного проката из стали 08кп

Ya. D. Vasilev /Dr. Sci. (Tech.)/

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro,  
Ukraine

## Investigation of the relationship between the thickness and the limit of the toxicity of the hot boxing and the mechanical properties of cold rolled steel from the steel 08kp

Приведены результаты экспериментального исследования влияния толщины и предела текучести горячекатаного подката на механические свойства холоднокатаного проката из стали 08кп в условиях ОАО «Запорожсталь». Установлено, что между толщиной и исходным пределом текучести горячекатаного подката и механическими свойствами холоднокатаного проката существует жесткая связь, приведены количественные данные, характеризующие эту связь. Показано, что уровень и нестабильность исходного

*предела текучести горячекатаного подката, особенно толщиной 2,0–2,3 мм, оказывает большое влияние на уровень и стабильность механических свойств холоднокатаного проката. Увеличение толщины холоднокатаного проката с 0,5 до 2,0 мм, получаемого из подката толщиной 2,0 и 4,0 мм, приводит к уменьшению предела текучести на 6,1 % и к увеличению относительного удлинения и штампуемости последнего соответственно на 10,3 и 31,4 %. (Ил. 4. Библиогр.: 8 назв.).*

**Ключевые слова:** горячекатаный подкат; холоднокатаный прокат; исследование; толщина; предел текучести; механические свойства; нестабильность.

Плоский холоднокатаный прокат из низкоуглеродистых сталей типа 08кп является одним из наиболее востребованных видов металлопродукции. Из такого проката методами холодной штамповки, гибки и сварки изготавливают легкие и прочные конструкции, которые находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Для получения изделий высокого качества листовой штамповкой холоднокатаный прокат должен отличаться оптимальным сочетанием и высокой стабильностью пластических и прочностных свойств. Поэтому к механическим свойствам и остальным показателям качества холоднокатаного проката из низкоуглеродистых сталей предъявляются высокие требования [1–3].

Производство плоского холоднокатаного проката отличается сложностью и многостадийностью технологического процесса, большим количеством технологических операций и большой длительностью технологического цикла. Это означает, что формирование механических свойств холоднокатаного проката происходит поэтапно, т. е. в логической последовательности и во взаимосвязи с параметрами технологии на каждой стадии процесса [1–4].

В связи с этим нестабильность технологических условий на любой предшествующей стадии процесса вызывает дополнительную нестабильность параметров технологии на последующих стадиях обработки. В этом смысле принципиальное значение для технологии производства плоского холоднокатаного проката приобретает вопрос об установлении взаимосвязи между толщиной и пределом текучести горячекатаного подката с механическими свойствами холоднокатаного проката. Как показали результаты последних исследований, толщина полосы является одним из факторов, оказывающих большое влияние на предел текучести горячекатаного подката [5]. Поэтому получение количественных данных о влиянии толщины и предела текучести горячекатаного подката на механические свойства холоднокатаного проката актуально.

Данная статья посвящена экспериментальному исследованию количественной взаимосвязи между толщиной и пределом текучести горячекатаного подката и механическими свойствами плоского холоднокатаного проката из стали 08кп в условиях ОАО «Запорожсталь».

Результаты теоретических исследований и накопленный практический опыт свидетельствуют о том, что взаимосвязь между механическими свойствами холоднокатаного проката и горячекатаного подката реализуется через параметры микроструктуры и свойства горячекатаного подката. Известно также, что общий характер микроструктуры горячекатаного подката сохраняется и в холоднокатаном прокате. Кроме того, установлено, что в процессе холодной прокатки не устраняется полностью крупнозернистость и неравномерность зерен, полученные при горячей прокатке. Из изложенного следует, что нестабильность свойств и параметров структуры горячекатаного подката практически исключают возможность для реализации производства холоднокатаного проката с высокими и стабильными показателями качества [1; 3; 4]. Поэтому получение горячекатаного подката с механическими свойствами и с параметрами структуры, удовлетворяющими современным требованиям технологии холодной прокатки, является необходимым условием для производства высококачественного холоднокатаного проката. Большинство исследователей сходятся во мнении, что наилучшей структурой горячекатаного подката, отвечающей требованиям и штамповки, и холодной прокатки, является структура с зернами феррита 7–8 баллов без грубых выделений цементита. Содержание структурно свободного цементита должно быть не более 3-го балла [1–4]. Кроме того, в металле подката должны отсутствовать неметаллические включения. Здесь уместно отметить, что в отечественной практике укоренилось ошибочное представление о том, что поскольку горячекатаный подкат не является товарной продукцией, то и требования к показателям качества последнего могут быть менее строгими. В действительности к стабильности технологии производства, параметрам микроструктуры, механическим свойствам, точности геометрических размеров и качеству поверхности горячекатаного подката должны предъявляться более жесткие требования, потому что он служит заготовкой для получения более тонких профилей холодной прокаткой, которые по определению должны обладать (и обладают) более высокими показателями качества. Обобщая сказанное, можно заключить, что проблема получения горячекатаного подката с требуемыми по-

казателями качества сегодня не получила своего оптимального решения.

Приведенные в данной статье материалы являются продолжением и логическим завершением ранее начатых исследований о взаимосвязи между толщиной, температурой конца горячей прокатки и пределом текучести горячекатаного подката, результаты которых опубликованы в работе [5]. В связи с этим ниже представлены только данные о механических свойствах холоднокатаного проката из стали 08кп, выпускаемого на ОАО «Запорожсталь», полученные в периоды выполнения работы [5]. Это позволило обеспечить идентичность химического состава холоднокатаного проката и горячекатаного подката и учесть влияние фактического предела текучести и остальных показателей качества горячекатаного подката на механические свойства холоднокатаного проката, поскольку оба исследования проводились одновременно и по единой методике. О механических свойствах холоднокатаного проката судили по результатам стандартных испытаний готовой продукции, проводимых на комбинате для каждой плавки стали. В ходе этих испытаний определяли значения предела текучести  $\sigma_T$ , относительного удлинения  $\delta_4$  и штампуемости JE холоднокатаного проката. Все результаты испытаний, зафиксированные на протяжении двух месяцев – одного зимнего (декабря) и одного летнего (июля) двух смежных лет, обрабатывались статистически по общепринятым методикам [6; 7].

Для удобства анализа полученные данные о механических свойствах холоднокатаного проката представлены в виде гистограмм. Однако прежде чем приступить к их обсуждению, представляется целесообразным остановиться на результатах исследования влияния толщины полосы на исходный предел текучести горячекатаного подката  $\sigma_{\text{тисх}}$  из стали 08кп, содержащиеся в работе [5]. В этой работе было экспериментально установлено, что на величину исходного предела текучести горячекатаного подката  $\sigma_{\text{тисх}}$  сильное влияние оказывает температура конца прокатки и толщина последнего (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что уменьшение толщины подката с 4,0 до 2,0 мм в результате уменьшения температуры конца горячей прокатки приводит к увеличению исходного предела текучести  $\sigma_{\text{тисх}}$  с 251 до 309 Н/мм<sup>2</sup>, или на 23,1 % [5]. Поэтому можно ожидать, что холоднокатаный прокат, получаемый из более тонкого подката, будет отличаться более высокими прочностными характеристиками, меньшей пластичностью и пониженной штампуемостью.

В сортамент холоднокатаного проката из стали 08кп, выпускаемого на ОАО «Запорожсталь», входят листы и полосы толщиной от 0,5 до 2,0 мм.

На рис. 2 приведены данные о распределении толщины (а) и исходного предела текучести (б) горячекатаного подката, используемого для производства каждого конкретного сорта размера холоднокатаного проката.

Из рис. 2 видно, что с уменьшением толщины холоднокатаного проката уменьшается толщина и увеличивается исходный предел текучести горячекатаного подката, применяемого для его

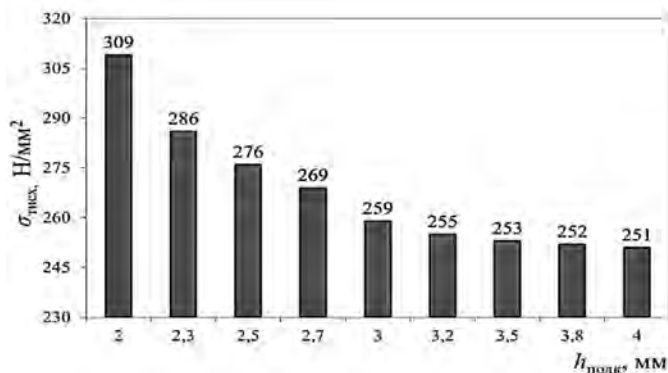
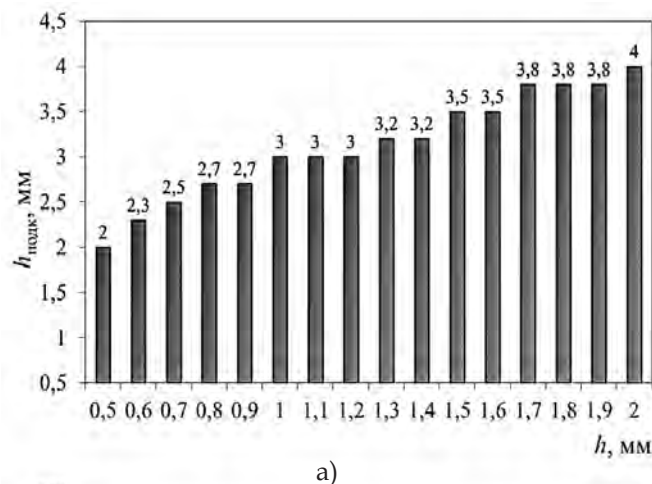
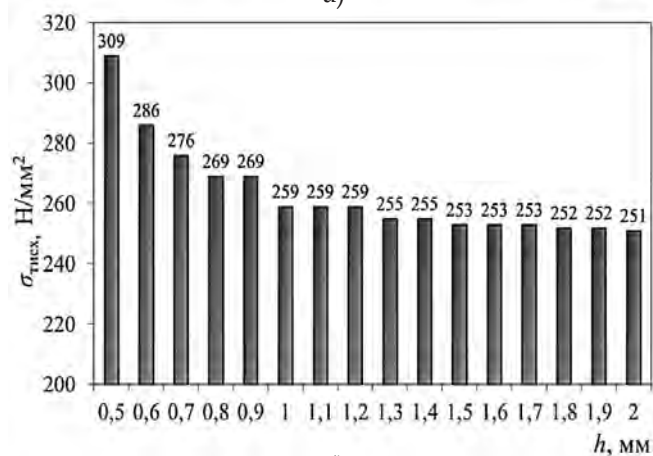


Рис. 1. Распределение исходного предела текучести  $\sigma_{\text{тисх}}$  от толщины горячекатаного подката  $h_{\text{подк}}$



а)



б)

Рис. 2. Распределение толщины  $h_{\text{подк}}$  (а) и исходного предела текучести горячекатаного подката  $\sigma_{\text{тисх}}$  (б) от толщины  $h$  холоднокатаного проката

производства. Наиболее существенное увеличение исходного предела текучести горячекатаного подката (с 259 до 309 Н/мм<sup>2</sup>, или на 19,3 %) наблюдается при уменьшении толщины холоднокатаного проката с 1,0–1,2 до 0,5 мм. Предел текучести подката при производстве более толстого (1,3–2,0) мм холоднокатаного проката остается практически неизменным (251–255 Н/мм<sup>2</sup>).

В соответствии с принятыми на комбинате режимами деформации суммарное относительное обжатие при холодной прокатке  $\epsilon_{\Sigma}$  составляет 0,50–0,75, причем большие величины суммарного относительного обжатия соответствуют меньшим толщинам прокатываемых полос (рис. 3а).

В процессе холодной прокатки деформируемый металл сильно упрочняется, и предел текучести холоднокатаного проката в наклепанном состоянии  $\sigma_{\text{те}}$  увеличивается. Для получения данных о  $\sigma_{\text{те}}$  воспользовались формулой А. В. Третьякова [8]:

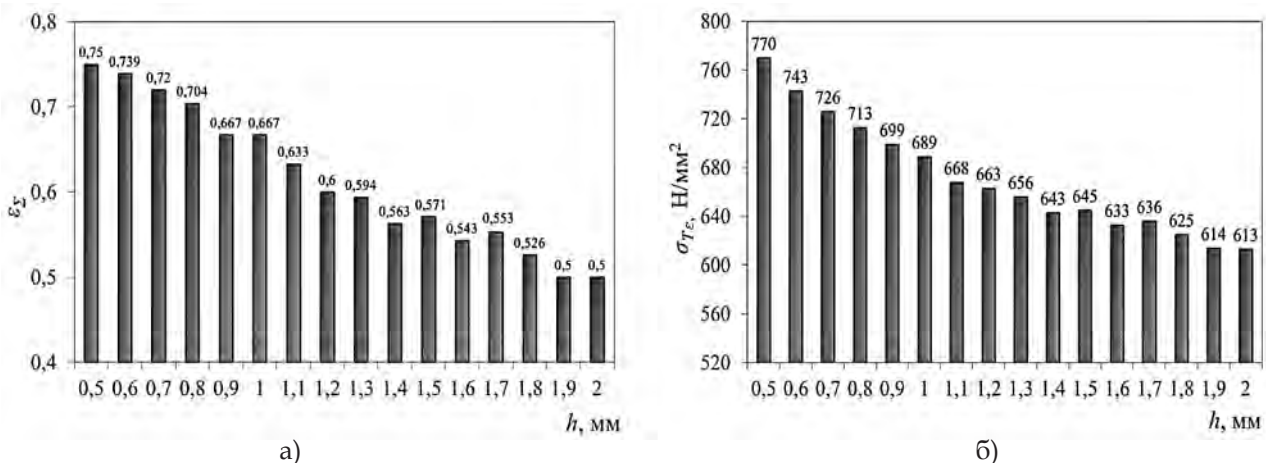
$$\sigma_{\text{те}} = \sigma_{\text{тикс}} + m (100\epsilon_{\Sigma})^k, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{тикс}}$  – среднестатистическое значение исходного предела текучести конкретной толщины подката из стали 08кп, Н/мм<sup>2</sup> (определяется по данным рис 1);  $m$  – множитель, характеризующий интенсивность упрочнения материала полосы (для стали 08кп  $m = 34,6$  Н/мм<sup>2</sup>);  $\epsilon_{\Sigma}$  – суммарное относительное обжатие подката при холодной прокатке, доли единицы;  $k$  – показатель степени, определяющий характер упрочнения материала полосы, безразмерная величина (для стали 08кп  $k = 0,6$ ). Результаты расчетов  $\sigma_{\text{те}}$  приведены на рис. 3б.

Как следует из рис. 3б, предел текучести холоднокатаного проката толщиной 0,5 мм в наклепанном состоянии  $\sigma_{\text{те}}$  достигает 770 Н/мм<sup>2</sup> и превышает существенно предел текучести наклепанного проката толщиной 2,0 мм (613 Н/мм<sup>2</sup>). Это превышение составляет 25,6 % и

практически равно относительному превышению исходного предела текучести подката (23,1 %), используемого для получения указанных толщин холоднокатаного проката (309 и 251 Н/мм<sup>2</sup>), и свидетельствует о наследственном характере формирования предела текучести при холодной прокатке. Наследственный характер изменения предела текучести материала полосы оказывает также большое влияние на уровень энергосиловых параметров при холодной прокатке, особенно при использовании тонкого горячекатаного подката. Расчеты показали и последующие исследования подтвердили, что при холодной прокатке тонких полос (0,5–0,6 мм) из подката толщиной 2,0–2,3 мм с учетом фактического уровня и разброса значений исходного предела текучести  $\sigma_{\text{тикс}}$  [5] наблюдается чрезмерное увеличение нагрузки на приводные двигатели непрерывного четырехклетового широкополосного стана холодной прокатки 1680 комбината «Запорожсталь», что приводит к необходимости снижения установленной скорости прокатки на 10–20 %.

Холоднокатаный прокат в наклепанном состоянии характеризуется высокими прочностными характеристиками и низкой пластичностью, что делает его мало пригодным для дальнейшей пластической деформации. Поэтому прокат после холодной прокатки подвергают рекристаллизационному отжигу для снятия внутренних напряжений в металле и формирования благоприятной микроструктуры, способствующей улучшению его штампуемости. Для предупреждения появления линий текучести при последующей холодной штамповке отожженный прокат дрессируют, т. е. прокатывают в холодном состоянии с малыми относительными обжатиями (0,8–1,4 %). Дрессировка является конечной технологической операцией, влияющей на механические свойства и качество поверхности холоднокатаного проката из стали 08кп.



**Рис. 3. Распределение суммарного относительного обжатия  $\epsilon_{\Sigma}$  (а) и предела текучести материала полосы в наклепанном состоянии  $\sigma_{\text{те}}$  (б) от толщины  $h$  холоднокатаного проката**

Из изложенного следует, что статистические данные о механических свойствах холоднокатаного проката представляют собой итог совместного влияния параметров технологии на всех стадиях процесса. Поэтому определить точно количественное влияние одного отдельно взятого параметра технологии на механические и технологические свойства холоднокатаного проката затруднительно. В настоящей работе по этим данным оценивали только приоритетное влияние толщины и механических свойств горячекатаного подката на механические и технологические свойства холоднокатаного проката.

Анализ результатов выполненного статистического исследования показал, что решающее влияние на уровень механических и технологических свойств холоднокатаного проката из стали 08кп оказывает толщина полосы  $h$  (рис. 4). Об этом свидетельствуют закономерности распределения предела текучести  $\sigma_T = \varphi(h)$  (рис 4а), относительного удлинения  $\delta_4 = \varphi(h)$  (рис 4б) и штампуемости (глубины лунки по Эриксену)  $JE = \varphi(h)$  (рис. 4в) холоднокатаного проката из стали 08кп, построенные по экспериментальным данным.

Из рис. 4а видно, что с увеличением толщины полосы предел текучести холоднокатаного проката уменьшается. Наибольшие значения предела текучести ( $260,3 \text{ Н/мм}^2$ ) соответствуют наименьшим толщинам (0,5–0,6 мм) холоднокатаного проката. Увеличение толщины полосы с 0,7–0,8 мм до 0,9–1,2 мм приводит к уменьшению предела текучести проката до  $246,5 \text{ Н/мм}^2$ . Дальнейшее увеличение толщины полосы на предел текучести проката практически не влияет. Установленный характер изменения предела текучести влияет также на уровень и характер изменения относительного удлинения  $\delta_4 = \varphi(h)$  (рис. 4б) и штампуемости  $JE = \varphi(h)$  (рис. 4в) холоднокатаного проката. Однако по сравнению с влиянием толщины полосы на предел текучести, влияние данного параметра на  $\delta_4$  и  $JE$  является ассиметричным, т. е. холоднокатаный прокат с большим пределом текучести характеризуется меньшей пластичностью и пониженной штампуемостью. Как следует из рис. 4б и 4в, увеличение толщины полосы с 0,5–0,6 до 0,7–1,2 мм способствует увеличению относительного удлинения  $\delta_4$  и штампуемости  $JE$  холоднокатаного проката соответственно с 34,5 до 38,2 %, или на 10,7 % и с 9,68 до 11,46 мм, или на 18,4%. Увеличение толщины полосы с 1,2 до 2,0 мм влияние на относительное удлинение практически не оказывает, хотя и способствует монотонному увеличению штампуемости холоднокатаного проката (рис. 4в). Обобщая сказанное, можно отметить, что с увеличением толщины полосы с 0,5 до 2,0 мм предел текучести холоднокатаного проката уменьшается

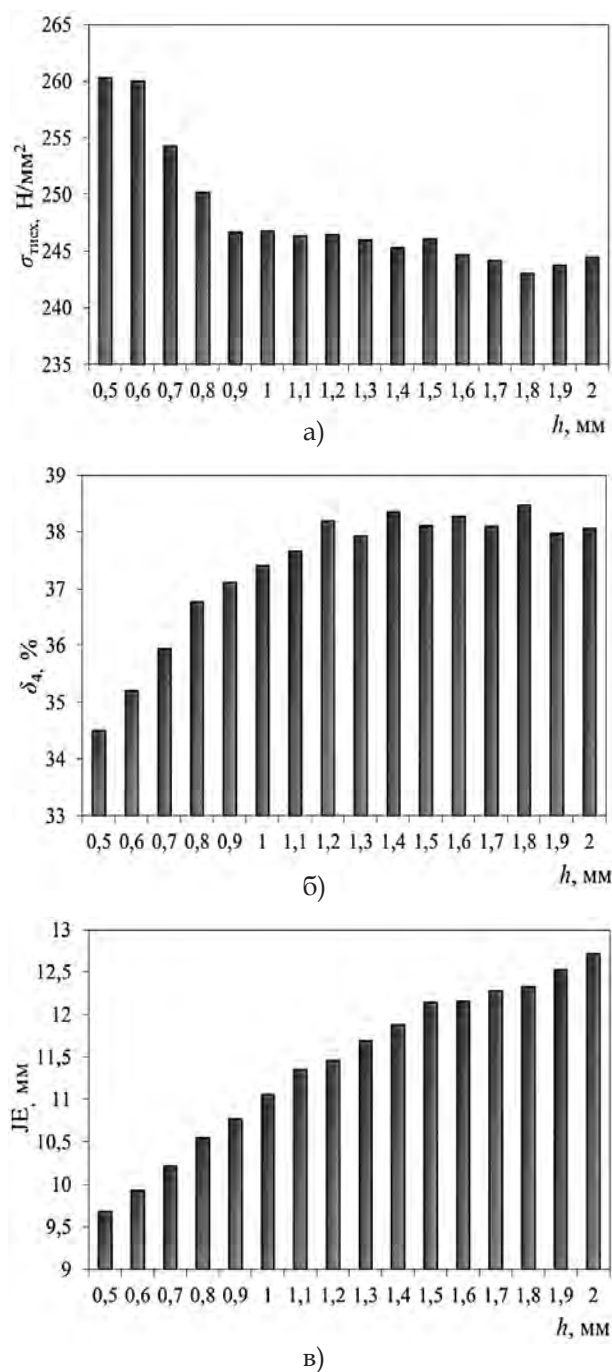


Рис. 4. Распределение предела текучести  $\sigma_T$  (а), относительного удлинения  $\delta_4$  (б) и штампуемости  $JE$  (в) от толщины холоднокатаного проката из стали 08кп

на 6,1 %, а относительное удлинение и штампуемость увеличиваются соответственно на 10,3 и 31,4 %. Сопоставление этих чисел с количественным влиянием толщины горячекатаного подката на исходный предел текучести последнего и сравнение гистограмм  $\sigma_{Тисх} = \varphi(h_{подк})$  (рис. 1) и  $\sigma_T = \varphi(h)$  (рис. 4а) позволяет заключить, что между толщиной и пределом текучести горячекатаного подката и механическими свойствами холоднокатаного проката существует жесткая связь. Хорошо видно, что более высокий уровень исходного

предела текучести тонкого (2,0–2,3 мм) горячекатаного подката приводит к дополнительному росту предела текучести и к ухудшению пластических и технологических свойств холоднокатаного проката толщиной 0,5–0,6 мм, получаемого из данного подката. Холоднокатаный прокат толщиной 1,2–2,0 мм, получаемый из подката толщиной 3,0–4,0 мм, характеризуется более низким пределом текучести (244,5–246,5 Н/мм<sup>2</sup>), более высоким относительным удлинением (≈38 %) и повышенной штампуемостью (11,46–12,72 мм). Эти данные свидетельствуют о необходимости и целесообразности использования горячекатаного подката с низким и стабильным исходным пределом текучести для производства холоднокатаного проката из стали 08кп, поскольку это обеспечивает получение готовой продукции с требуемым сочетанием и с более высокой стабильностью прочностных, пластических и технологических свойств.

**Выводы.** Результаты выполненного экспериментального исследования показали, что между толщиной и исходным пределом текучести горячекатаного подката и механическими свойствами холоднокатаного проката из стали 08кп существует жесткая связь, получены количественные данные, характеризующие эту связь. Показано, что уровень и стабильность исходного предела текучести горячекатаного подката, особенно толщиной 2,0–2,3 мм, оказывает большое влияние на уровень и стабильность механических свойств холоднокатаного проката. Установлено, что в условиях ОАО «Запорожсталь» увеличение толщины холоднокатаного проката с 0,5 до 2,0 мм приводит к уменьшению предела текучести на 6,1 % и к увеличению относительного удлинения и штампуемости последнего соответственно на 10,3 и 31,4 %.

Приведенные в статье материалы могут быть использованы для совершенствования технологии производства холоднокатаного проката из стали 08кп на комбинате «Запорожсталь» и повышения качества выпускаемой продукции.

#### **Библиографический список / References**

1. Коцарь С. Л. Технология листопрокатного производства / С. Л. Коцарь, А. Д. Белянский, Ю. А. Мухин. – М.: Металлургия, 1997. – 272 с.  
Kotsar' S. L., Belyanskiy A. D., Mukhin Yu. A. *Tekhnologiya listoprokatnogo proizvodstva*. Moscow, Metallurgiya, 1997, 272 p.
2. Беньяковский М. А. Производство автомобильного листа / М. А. Беньяковский, В. Л. Мазур, В. И. Мелешко. – М.: Металлургия, 1979. – 256 с.  
Benyakovskiy M. A., Mazur V. L., Meleshko V. I. *Proizvodstvo avtomobil'nogo lista*. Moscow, Metallurgiya, 1979, 256 p.
3. Железнов Ю. Д. Совершенствование производства холоднокатаной листовой стали /

Ю. Д. Железнов, В. А. Черный, А. П. Кошка [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.

Zheleznov Yu. D., Chernyy V. A., Koshka A. P. *Sovershenstvovanie proizvodstva kholodnokatanoy listovoy stali*. Moscow, Metallurgiya, 1982, 232 p.

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

Ksenzuk F. A., Troshchenkov N. A., Chekmarev A. P., Saf'yan M. M. *Prokatka avtolistovoy stali*. Moscow, Metallurgiya, 1969, 296 p.

5. Василев Я. Д. Исследование взаимосвязи толщины, температуры конца прокатки и предела текучести горячекатаного подката из стали 08кп / Я. Д. Василев // Сталь. – 2016. – № 12. – С. 34–39.

Vasilev Ya. D. *Issledovanie vzaimosvyazi tolshchiny, temperatury kontsa prokatki i predela tekuchesti goryachekatanogo podkata iz stali 08kp*. *Stal'*. 2016, no. 12, pp. 34–39.

6. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов экспериментов / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

Rumshinskiy L. Z. *Matematicheskaya obrobka rezul'tatov eksperimentov*. Moscow, Nauka, 1971, 192 p.

7. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. 5-е изд. / Г. Корн, Л. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

Korn G., Korn L. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. Moscow, Nauka, 1984, 831 p.

8. Целиков А. И. Теория прокатки. Справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин, А. В. Третьяков. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

Tselikov A. I., Tomlenov A. D., Zyuzin V. I., Tretyakov A. V. *Teoriya prokatki. Spravochnik*. Moscow, Metallurgiya, 1982, 335 p.

*Presented the results of experimental research for influence of thickness and yield strength of hot-rolled strip on mechanical properties of cold-rolled steel 08kp at the plant of JSC «Zaporizhstal». It is established that between the thickness and the initial yield point hot-rolled strip and mechanical properties of cold-rolled steel there is a rigid connection and provides quantitative data describing this connection. It is shown that the level and the instability of the initial yield strength of hot-rolled strip, particularly a thin thickness 2,0–2,3 mm, has a great influence on the level and stability of mechanical properties for cold-rolled steel. Increased thickness for cold-rolled steel with 0,5–2,0 mm, obtained from strip with a thickness of 2,0 and 4,0 mm, leads to a decrease of the yield strength by 6,1 % and increased the elongation and the ability to sheet extract last respectively 10,3 to 31,4 %.*

**Key words:** hot rolled strip; cold rolled strip; research; thickness; yield strength; distribution; mechanical properties; instability.

**Рекомендована к публикации  
д. т. н. В. Ф. Балакиным**

**Поступила 14.02.2018**