

УДК 621.746:620.17.001.5

Д. Г. Паламар, С. О. Воробей, В. Г. Раздобрєєв, Т. В. Балаханова

**ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ПО ПЕРЕРІЗУ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТИХ ЗАГОТОВОК***Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України*

Метою роботи є дослідження нерівномірності механічних властивостей по перерізу безперервнолитих заготовок різних виробників України. Механічні властивості визначалися методом вимірювання твердості по Брінеллю. Розроблялися математичних залежностей для її опису та визначення необхідності врахування цього фактора при розрахунках напружено-деформованого стану заготовок. Встановлено, що твердість приповерхневого шару заготовок, як правило, вище, ніж центральної зони на 0,5-7,6 %. Це пов'язано з більш дрібною і щільною дендритною структурою поверхневих шарів. Найбільша відмінність спостерігається в заготовках товщиною 410 мм із сталі марки 20. У заготовках зі сталі марки 45 відмінність твердості приповерхневого шару і центральної зони становить 0,5-4,7 % і практично не залежить від товщини заготовки в дослідженому інтервалі (135-350 мм). Показано, що при дослідженні напружено-деформованого стану металу при прокатці безперервнолитих заготовок з низьковуглецевих сталей доцільно враховувати нерівномірність розподілу механічних властивостей по їх перерізу. Для заготовок з середньо вуглецевої сталі цей фактор враховувати необов'язково. На підставі літературних даних і результатів виконаних експериментальних досліджень запропоновано залежності, що описують зміну міцностних і пластичних властивостей по перерізу безперервнолитих заготовок з низьковуглецевих сталей. Ці залежності доцільно використовувати при розрахунку напружено-деформованого стану металу. Для заготовок з середньовуглецевої сталі цей фактор враховувати необов'язково.

**Ключові слова:** безперервнолита заготовка, переріз, напружено-деформований стан металу, механічні властивості

**Вступ.** При розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) металу в осередках деформації робочих клітей, впливу на нього параметрів деформації та схем калібрів, необхідно враховувати фактичний розподіл значень опору деформації по перерізу заготовок, який залежить від розподілу температури і вихідних механічних властивостей (якщо вони змінюються суттєво). На підставі результатів теоретичних та експериментальних досліджень нами були встановлені залежності для розрахунку розподілу температури по перерізу прокату, які враховують розігрівання металу від роботи деформації та контактних сил тертя, а також охолодження металу на повітрі і від контакту з робочими валками [1, 2]. В розрахунках НДС для врахування впливу нерівномірності вихідних механічних властивостей заготовок необхідно їх задати у вигляді математичних залежностей. Такі залежності в технічний літературі відсутні.

**Мета роботи.** Дослідження нерівномірності механічних властивостей по перерізу безперервнолитих заготовок різного розміру і розробка математичних залежностей для її опису та визначення необхідності врахування цього фактора при розрахунках НДС.

**Сучасний стан питання.** Безперервноліті заготовки завдяки меншій товщині і швидшому затвердінню відрізняються від злитків, що розливають у виливниці, меншим розвитком хімічної неоднорідності, більш рівномірним розподілом структури і неметалічних включень. Литу структуру безперервнолитих заготовок можна охарактеризувати наявністю трьох зон: поверхневої зони дрібних рівноосних кристалів, зони стовпчастих кристалів і центральної зони рівноосних кристалів. Залежно від розмірів перерізу заготовки, умов кристалізації і марки стали, співвідношення цих зон може змінюватися [3].

Макроструктура заготовок визначає величину мінімальної витяжки, яка забезпечує необхідний рівень якості готового прокату [4]. Окрім типу та розмірів дендритів на величину мінімально необхідної витяжки (обтиснення) впливають інші параметри макроструктури заготовок - осьова хімічна неоднорідність, ліквацийні смужки і тріщини, точкова неоднорідність і великі неметалеві включення. Зі збільшенням витяжки центральна пористість і підсадочна ліквация зменшуються, в той час як точкова неоднорідність практично не змінюється. Для забезпечення необхідної макроструктури прокату необхідно, щоб такі дефекти безперервнолитих заготовок як точкова неоднорідність і ліквацийні смужки не перевищували обмежень відповідних стандартів готового прокату.

Авторами робіт [5, 6] виконані дослідження якості безперервнолитих заготовок зі сталей з вмістом вуглецю 0,08 - 0,16 %. Було підтверджено, що безперервноліті заготовки характеризуються більш рівномірним розподілом хімічних елементів, меншою кількістю усадочних і ліквацийних дефектів в порівнянні металом, які були розлиті в виливниці.

Напружений стан при деформації залежить від багатьох факторів, одним з яких є співвідношення діаметру валків до товщини заготовки. Тому, на практиці, при інших рівних умовах, чим менше переріз вихідної заготовки, тим при меншому значенні коефіцієнта витяжки можна досягти сприятливого напружено-деформованого стану центральної зони заготовки. Однак для підтвердження цього необхідно дослідити особливості макроструктури і розподілу механічних властивостей заготовок різного перерізу.

**Результати досліджень.** На підставі матеріалів роботи [5], отриманих для заготовки перерізом 160x160 мм, нами запропоновано залежності для опису зміни характеристик міцності і пластичних властивостей по перерізу безперервнолитих заготовок зі сталей з вмістом вуглецю 0,08 - 0,16%:

$$\sigma_{Tц} = K_T \times \sigma_{Tпов} \quad (1)$$

$$\sigma_{Bц} = K_B \times \sigma_{Bпов} \quad (2)$$

$$\delta_{ц} = K_d \times \delta_{пов} \quad (3)$$

$$KCV_{ц} = K_y \times KCV_{пов} \quad (4)$$

де  $\sigma_{Tц}$  и  $\sigma_{Tпов}$  – границя плинності в центральній частині та на поверхні заготовки, відповідно;

$\sigma_{Bц}$  и  $\sigma_{Bпов}$  – тимчасовий опір розриванню в центральній частині та на поверхні заготовки, відповідно;

$\delta_{ц}$  и  $\delta_{пов}$  – відносне подовження в центральній частині та на поверхні заготовки, відповідно;

$KCV_{ц}$  и  $KCV_{пов}$  – ударна в'язкість в центральній частині та на поверхні заготовки відповідно;

$K_T, K_B, K_d, K_y$  - коефіцієнти.

Розподіл значень коефіцієнтів  $K_T, K_B, K_d, K_y$  по перерізу безперервнолитої заготовки ( $z / H$ , де  $z$  - поточна координата по товщині безперервнолитої заготовки, починаючи від поверхні) представлені в табл.1 та на рис.1.

Таблиця 1. Розподіл значень коефіцієнтів  $K_T, K_B, K_d, K_y$  за перерізом безперервнолитої заготовки

$z/H$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$K_T$	0,993	0,986	0,977	0,966	0,952	0,936	0,918	0,897	0,874
$K_B$	0,989	0,983	0,977	0,969	0,961	0,952	0,942	0,931	0,920
$K_d$	0,967	0,947	0,927	0,907	0,887	0,867	0,847	0,827	0,807
$K_y$	0,861	0,791	0,721	0,652	0,582	0,512	0,443	0,373	0,304

Наведені данні показують суттєво зменшення міцності та пластичності від поверхні до центру безперервнолитої заготовки (на 8-13 %). Разом з тим різниця пластичних властивостей по перерізу безперервнолитої заготовки з низьковуглецевих сталей досягає, як мінімум, 13 %, а ударної в'язкості – 67 %. Результати, що отримано, дозволяють враховувати ці залежності в розрахунках НДС. Результати розрахунків показують, що менша міцність металу центральної зони заготовки сприяє збільшенню напружено-деформованого стану цієї зони.

Для перевірки отриманих результатів нами було проведено дослідження особливостей макроструктури і розподілу механічних властивостей (твердості по Брінеллю) по перерізу заготовок різного розміру двох марок сталі – 20 і 45. Для дослідження були відібрані зразки безперервнолитої заготовки виробництва ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» перерізом 350×500, 410×500, 335×400 мм; ТОВ

«Електросталь» (м Курахово, Донецька обл.) перерізом 135×135 мм; ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» перерізом 300×1000 мм. Зразки відбирали в трьох місцях по перерізу заготовок - від поверхні, центральної зони і  $\frac{1}{4}$  товщини. Для кожної ділянки проводили 3-6 вимірювань. У зразках поверхневої зони вимірювання проводили на відстані  $\approx 10$  мм від поверхні заготовки. Дендритна структура заготовок наведена на рис.2-6, а середні значення твердості - в табл.2.

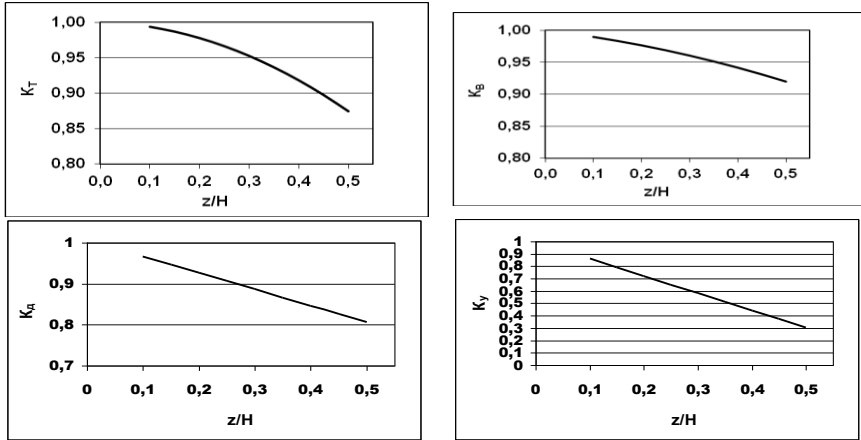


Рисунок 1 – Розподіл значень коефіцієнтів  $K_T$ ,  $K_B$ ,  $K_d$ ,  $K_y$  по перерізу безперервної заготовки

Таблиця 2. Характеристика БЛЗ і результати вимірювання твердості

Номер заготовки	Переріз БЛЗ, $h \times b$ , мм марка сталі	Вміст хімічних елементів, % (мас.)			Місце вимірювання	Твердість, НВ	$\Delta$ НВ*, %
		C	Mn	Si			
1	$\frac{350 \times 500}{45}$	0,48	0,78	0,27	поверхня	209	0,5
					$\frac{1}{4}$ товщини	206	
					центр	208	
2	$\frac{410 \times 500}{20}$	0,22	0,40	0,22	поверхня	132	7,6
					$\frac{1}{4}$ товщини	132	
					центр	122	
3	$\frac{335 \times 400}{45}$	0,46	0,68	0,29	поверхня	202	1,5
					$\frac{1}{4}$ товщини	202	
					центр	199	
4	$\frac{135 \times 135}{45}$	0,49	0,71	0,18	поверхня	206	4,4
					$\frac{1}{4}$ товщини	204	
					центр	197	
5	$\frac{300 \times 1000}{45}$	0,47	0,81	0,29	поверхня	215	4,7
					$\frac{1}{4}$ товщини	208	
					центр	205	

Примітка. \* – Різниця твердості поверхні і центру

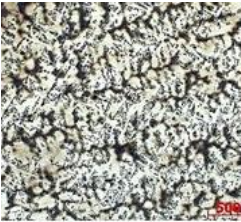


поверхня

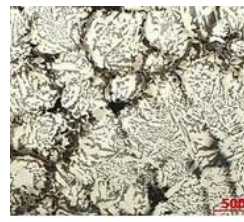
 $\frac{1}{4}$  товщини

центр

Рисунок 2 – Первинна структура БЛЗ 350×500 мм



поверхня

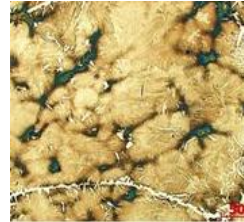
 $\frac{1}{4}$  товщини

центр

Рисунок 3 – Первинна структура БЛЗ 410×500 мм



поверхня

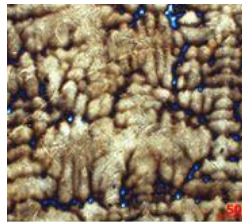
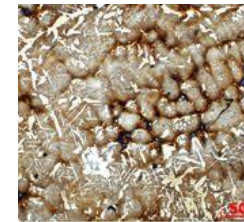
 $\frac{1}{4}$  товщини

центр

Рисунок 4 – Первинна структура БЛЗ 335×400 мм



поверхня

 $\frac{1}{4}$  товщини

центр

Рисунок 5 – Первинна структура БЛЗ 135×135 мм



Рисунок 6 – Первинна структура БЛЗ 300×1000 мм

На рис.7 показано зміну відносної твердості металу (по відношенню до твердості приповерхневого шару) по товщині БЛЗ зі сталі марок 45 і 20.

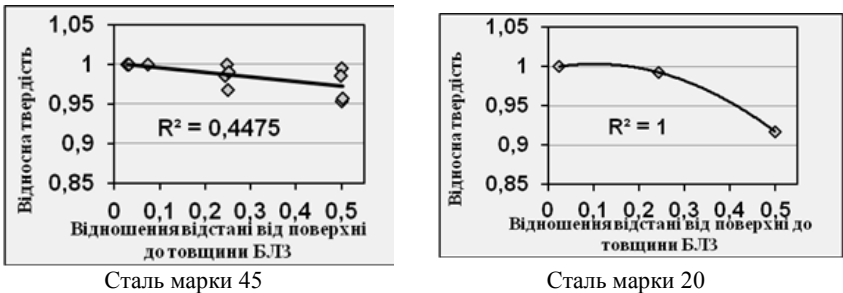


Рисунок 7 – Зміна відносної твердості металу по товщині БЛЗ

Аналіз отриманих результатів показав наступне.

Твердість приповерхневого шару заготовок, як правило, вище, ніж центральної зони на 0,5-7,6 %. Це пов'язано з більш дрібною і щільною дендритною структурою поверхневих шарів. Найбільша різниця спостерігається в заготовках зі сталі марки 20 (у середньому 7,6 %). Цій рівень відповідає результатам, отриманим в роботі [5].

У заготовках зі сталі марки 45 відмінність твердості приповерхневого шару і центральної зони становить 0,5-4,7 % і практично не залежить від товщини заготовки в дослідженому інтервалі (135-350 мм).

Таким чином, при дослідженні напружено-деформованого стану металу при прокатці безперервнолитих заготовок з низьковуглецевих сталей доцільно враховувати нерівномірність розподілу механічних властивостей по їх перерізу. Для заготовок з середньо вуглецевої сталі цей фактор враховувати необов'язково.

У той же час, за нашими розрахунками, нерівномірність розподілу температури по перерізу розкату – більш значущий фактор. Так, при різниці температур між поверхнею заготовки та центром 30-40 °С (що відповідає умовам охолодження на повітрі) границя плинності

відрізняється на 8-11 %. А в осередку деформації, де різниця температур між центром і поверхнею прокату досягає 100 °С і більше – відмінність значень границі плинності може скласти 25-30 %.

### **Висновки.**

1. Досліджено дендритну структуру і розподіл механічних властивостей (твердості) по перерізу безперервнолитих заготовок розміром 135×135, 350×500, 335×400, 410×500 та, 300×1000 мм зі сталі марок 20 і 45. Встановлено, що відмінність твердості приповерхневих і центральних зон безперервнолитих заготовок з низьковуглецевої сталі з вмістом вуглецю 0,22 % суттєво вище, ніж зі сталі з вмістом вуглецю 0,45-0,49 % - до 8 і до 5 % відповідно.

2. На підставі літературних даних і результатів виконаних експериментальних досліджень запропоновано залежності, що описують зміну міцностних і пластичних властивостей по перерізу безперервнолитих заготовок з низьковуглецевих сталей. Ці залежності доцільно використовувати при розрахунку напружено-деформованого стану металу. Для заготовок з середньовуглецевої сталі цей фактор враховувати необов'язково.

### **Бібліографічний список**

1. Паламарь Д.Г. Метод оценки напряженно-деформированного состояния осевой зоны раската при горячей сортовой прокатке / Д.Г. Паламарь, С.А. Воробей, А.П. Лохматов, С.В. Ершов // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА, Краматорськ: из-во ДГМА, 2013. – №2. – С. 43-48.

2. Паламарь Д.Г. Влияние элементов ящичного калибра на интенсификацию деформации центральных зон сечения раската из непрерывнолитой заготовки / Д.Г. Паламарь // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. ИЧМ, Днепропетровск: «ВІЗІОН», 2013. – Вып. 27. – С. 179-184.

3. Особенности качества непрерывнолитых заготовок различного сечения / В.С. Лучкин, С.А. Воробей, Г.В. Левченко [и др.] // Металл и литье Украины. - 2005. - № 5. - С. 30-33.

4. Либерман А.Л. Минимальное обжатие непрерывнолитых заготовок для получения качественного проката / А.Л. Либерман, И.В. Дубровин // Металлург. – 1993. - №4. - С. 31-34.

5. Смирнов Е.Н. Свойства и структура заготовок из непрерывнолитого металла для производства проката ответственного назначения / Е.Н. Смирнов // Металл и литье Украины. – 2001. - №3-4. - С. 17-20.

6. Качество горячекатаной стали, полученной из непрерывнолитой заготовки / Н.Г. Гладышев, В.П. Дружинин [и др.] // Бюллетень центрального научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии. – 1965. - №10. - С. 42-43.

## Reference

1. *Palamar' D.G.* Metod otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osevoy zony raskata pri goryachey sortovoy prokatke / D.G. Palamar', S.A. Vorobey, A.P. Lokhmatov, S.V. Yershov // Obrabotka materialov davleniyem: sb. nauch. tr. DGMA, Kramators'k: iz-vo DGMA, 2013. – №2. – S. 43-48.
2. *Palamar' D.G.* Vliyaniye elementov yashchichnogo kalibra na intensivnitsiyu deformatsii tsentral'nykh zon secheniya raskata iz nepreryvnolitoi zagotovki / D.G. Palamar' // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii: sb. nauch. tr. ICHM, Dnepropetrovsk: «VÍZÍON», 2013. – Vyp. 27. – S. 179-184.
3. *Osobennosti kachestva nepreryvnolitykh zagotovok razlichnogo secheniya /V.S. Luchkin, S.A. Vorobey, G.V. Levchenko [i dr.] // Metall i lit'ye Ukrainy. - 2005. - № 5. - S. 30-33.*
4. *Lieberman A.L.* Minimal'noye obzhatiye nepreryvnolitykh zagotovok dlya polucheniya kachestvennogo prokata / A.L. Liberman, I.V. Dubrovin // Metallurg. – 1993. - №4. - S. 31-34.
5. *Smirnov Ye.N.* Svoystva i struktura zagotovok iz nepreryvnolitogo metalla dlya proizvodstva prokata otvetstvennogo naznacheniya / Ye.N. Smirnov // Metall i lit'ye Ukrainy. – 2001. - №3-4. - S. 17-20.
6. *Kachestvo goryachekatanoy stali, poluchenoj iz nepreryvnolitoi zagotovki / N.G. Gladyshev, V.P. Druzhinin [i dr.] // Byulleten' tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy chernoy metallurgii. – 1965. - №10. - S. 42-43.*

*Д. Г. Паламарь, С. А. Воробей, В. Г. Раздобреев, Т. В. Балаханова*

### **Исследование неравномерности механических свойств по сечению непрерывнолитых заготовок**

Целью работы является исследование неравномерности механических свойств по сечению непрерывнолитых заготовок различных производителей Украины. Механические свойства определялись методом измерения твердости по Бринеллю. Разрабатывались математические зависимости для их описания и определения необходимости учета этого фактора при расчетах напряженно-деформированного состояния заготовок. Установлено, что твердость приповерхностного слоя заготовок, как правило, выше, чем центральной зоны на 0,5-7,6%. Это связано с более мелкой и плотной дендритной структурой поверхностных слоев. Самое большое отличие наблюдается в заготовках толщиной 410 мм из стали марки 20. В заготовках из стали марки 45 отличие твердости приповерхностного слоя и центральной зоны составляет 0,5-4,7% и практически не зависит от толщины заготовки в исследованном интервале (135-350 мм). Показано, что при исследовании напряженно-деформированного состояния металла при прокатке непрерывнолитых заготовок из низкоуглеродистых сталей целесообразно учитывать неравномерность распределения механических свойств по сечению. Для заготовок из средне углеродистой стали этот фактор учитывать необязательно. На основании литературных данных и результатов выполненных экспериментальных исследований предложены зависимости, описывающие изменение прочностных и пластических свойств по сечению непрерывнолитых заготовок из низкоуглеродистых сталей. Эти зависимости целесообразно



использовать при расчете напряженно-деформированного состояния металла. Для заготовок из среднеуглеродистой стали этот фактор учитывать необязательно.

**Ключевые слова:** непрерывнолитая заготовка, сечение, напряженно-деформированное состояние металла, механические свойства, твердость

*D. G. Palamar, S. A. Vorobey, V. G. Razdobreev, T. V. Balahanova*

**Investigation of the unevenness of mechanical properties along the cross-section of continuously cast billets**

The aim of the work is to study the non-uniformity of mechanical properties in the cross section of continuously cast billets of various manufacturers in Ukraine. Mechanical properties were determined by the method of measuring Brinell hardness. Mathematical relationships were developed to describe them and determine the need to take this factor into account when calculating the stress-strain state of blanks. It is established that the hardness of the surface layer of blanks, as a rule, is higher than the central zone by 0.5-7.6%. This is due to the smaller and dense dendritic structure of the surface layers. The biggest difference is observed in workpieces with a thickness of 410 mm made of steel grade 20. In workpieces made of steel grade 45, the difference in hardness of the surface layer and the central zone is 0.5-4.7% and practically does not depend on the thickness of the workpiece in the investigated interval (135-350 mm). It is shown that in the study of the stress-strain state of the metal when rolling continuously cast billets of low-carbon steels, it is advisable to take into account the uneven distribution of mechanical properties over the cross section. For medium carbon steel blanks, this factor is optional. On the basis of literature data and the results of experimental studies performed, dependencies describing the change in strength and plastic properties in the cross section of continuously cast billets of low carbon steels are proposed. These dependencies should be used in the calculation of the stress-strain state of the metal. For medium-carbon steel blanks, this factor is optional.

**Keywords:** continuous-cast billet, section, stress-strain state of metal, mechanical properties, hardness

*Стаття надійшла до редакції збірника 29.10.2018 року,  
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування  
(Протокол засідання редакційної колегії збірника №1  
від 26 грудня 2018 року)*

*Рецензенти: д.т.н. М.В.Куваев, д.т.н. І.Ю.Приходько*