

Л. В. Опрышко, Т. В. Головняк, П. В. Герасименко, Л. М. Дейнеко

**Формирование структуры котельных горячекатаных труб при их производстве из недеформированных непрерывнолитых заготовок**

**Резюме**

Исследованы закономерности формирования структуры котельных труб стали марок 20 и 12Х1МФ в процессе трубного передела недеформированных непрерывнолитых заготовок на трубопрокатном агрегате с 3-х валковым раскатным станом (ТПА 50-200). Установлено влияние кристаллического строения исходных НЛЗ, схемы и степени их деформации на ТПА 50-200 и последующей термической обработки на структуру металла котельных труб.

L.V. Oprishko, T.V. Golovnyak, P.V. Gerasimenko, L.N. Deyneko

**Structure formation in hot-rolled boiler tubes during their production from non-deformed continuously cast billets**

**Summary**

Mechanisms of structure formation in boiler tubes of steel grades 20 and 12X1MФ during tube production from non-deformed continuously cast billets (CCB) at a tube rolling unit with a 3-roll elongating mill (TRU 50-200) were studied. Effect of crystal structure of the initial CCB, scheme and ratio of deformation at TPU 50-200 and subsequent thermal treatment on the structure of boiler tube metal was established.

УДК 669.018.25+620.178.15

*Здатність інструментальних сплавів до дисипації енергії у мікрооб'ємах*

В. В. Пашинський, доктор технічних наук  
М. Г. Субботіна, В. І. Закієв\*

Донецький національний технічний університет, Донецьк  
\*Національний авіаційний університет, Київ

*Визначено властивості малопластичних сплавів методом кінетичного інденування на прикладі сталі Х12Ф1, твердого сплаву ВК30 та порошкового сплаву на основі ТіС. Оцінені енергетичні показники поведінки матеріалів і встановлено, що сплав ВК30 дисипує частину прикладеної енергії більшу (81,2 %), ніж сталь (75,4 %) та сплав на основі ТіС (68,1 %). Розрахована межа пружності при інденуванні  $\sigma_{ind}$ , яка склала  $3,9 \pm 0,7$  ГПа для сплаву на основі ТіС,  $2,6 \pm 0,3$  Па для сталі Х12Ф1,  $2,1 \pm 0,7$  ГПа для ВК30, відповідно.*

**М**етод кінетичного інденування може бути використано для визначення механічних властивостей малопластичних сплавів. Цей метод активно використовує велика кількість сучасних авторів [1 – 8].

## Структура і фізико-механічні властивості

Дослідження вели на зразках: 1 – сталь Х12Ф1, яка була гартована від 1100 °С (15 % карбідів, 60 % залишкового аустеніту); 2 – твердого сплаву ВК30 (30 % Со – 70 % WC); 3 – порошкового спеченого сплаву на базі 50 % TiC з Ni-Ti матрицею (Т50Т39Н11). Такий вибір був зумовлений тим, що наведені матеріали мають різний комплекс фізико-механічних властивостей, але можуть бути використані у суміжних галузях.

Випробування були проведені на пристрої «Мікрон-гамма» і полягали у наступному: на зразок була опущена піраміда Віккерса зі швидкістю 5 г/с до навантаження 0,5 Н, в той самий час пристрій фіксував криву в координатах: заглиблення індентора – навантаження ( $h$ - $P$ ). Загальний вид такого графіка наведений на рис. 1 а.

Така крива дозволяє визначити величини:  $h_{\max}$  – максимальна глибина відбитка (невідновленого),  $h_s$  – величина безконтактного заглиблення,  $h_c$  – величина контактної заглиблення,  $h_f$  – залишкова глибина відбитку після знаття навантаження (рис. 1 б).

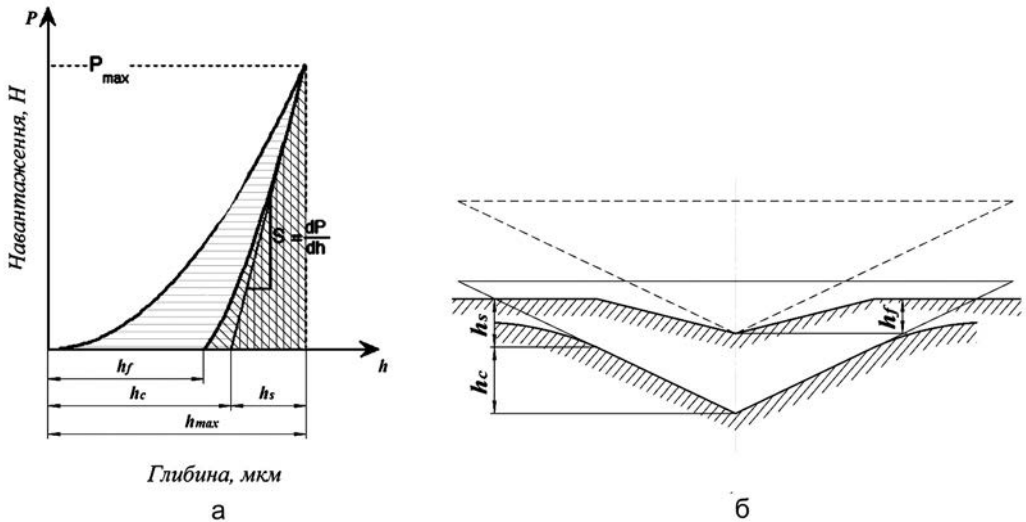


Рис. 1. Вид кривої індентування (а) та схема деформування площини шліфа під індентором (б).

За отриманими даними були встановлені показники енергетичних витрат, які відповідають площинам під кривими на графіку індентування (рис. 1 а):  $W_{pl}$  – енергія, що поглинається та розсіюється матеріалом за цикл навантаження-розвантаження;  $W_e$  – енергія пружного відновлення;  $W_s$  – енергія, що була витрачена на здійснення безконтактної пружної деформації;  $W_c$  – на пружно-пластичну деформацію;  $W_{ce}$  – на пружну деформацію в контактній зоні відбитка. Встановлені величини приведені в таблиці.

Дані у таблиці свідчать про те, що сплав ВК30 дисипує більшу частину переданої енергії, ніж сплав Т50Н39Н11 і навіть сталь ( $W_{pl}/W_{зар} = 81,2\%$ ), але для його деформування потрібна максимальна кількість енергії ( $W_{зар} = 332,3 \cdot 10^{-9}$  Дж). Така поведінка сплаву ВК30 пояснюється високим

## Структура і фізико-механічні властивості

Енергетичні показники матеріалів ( $10^{-9}$  Дж)

$W_{pl}$	$W_e$	$\frac{W_{zar}}{(W_{pl} + W_e)}$	$\frac{W_{pl}}{W_{zar}},$ %	$W_s$	$W_{ce}$	$\frac{W_{ce}}{W_e},$ %	$\frac{W_{ce}}{W_{zar}},$ %	$W_c$
195,2±8,3	63,6±1,8	258,8±6,6	75,4±1,3	39,7±2,9	23,9±1,3	37,7±2,9	9,3±0,4	219,1±9,3
270,7±45,4	61,6±4,1	332,3±46,7	81,2±2,8	37,5±4,4	24,1±7,9	38,7±10,5	7,3±2,2	294,8±47,4
136,9±14,1	63,9±6,5	200,8±15,2	68,1±3,2	37,0±5,3	26,9±2,1	42,3±3,2	13,4±0,9	163,8±14,8

вмістом у ньому WC – твердого (HV=22 ГПа [8]) і водночас відносно пружного з'єднання. Карбід титану має твердість вище (HV=32 ГПа [8]), але енергії на деформування сплаву T50H39H11 було затрачено менше.

Відзначимо різницю у значенні  $W_{ce}$  енергії пружної деформації в контактній зоні відбитка, особливо в порівнянні із загальною енергією пружного відновлення  $W_e$  та сумарною енергією  $W_{zar}$ . Сплав T50T39H11 має найвищі показники пружної енергії  $W_{ce}, W_e, (W_{ce}/W_e)$  та  $(W_{ce}/W_{zar})$ , але відомо, що сплави на основі карбіду титану мають високу крихкість та низьку експлуатаційну стійкість порівняно зі сплавами на основі карбіду вольфраму. Тому з наведених результатів можна зробити такий висновок: на покращення комплексу властивостей сплаву вказує зниження показників  $W_{ce}, W_e, (W_{ce}/W_e), (W_{ce}/W_{zar})$  або підвищення показників  $W_{pl}$  і  $W_{pl}/W_{zar}$ . Такий результат може бути використаний під час прогнозування стійкості сплавів.

Була встановлена пружна жорсткість матеріалу  $S$ , яка дорівнює диференціалу апроксимуючої кривої начального етапу гілки розвантаження. Апроксимуюча функція виду  $P = \alpha (h - h_f)^m$ , де  $\alpha, m$  – важливі константи. Були підібрані такі апроксимуючі рівняння: для сталі X12Ф1  $P = 0,045849 (h - hf)^{1,59}$ ,  $S = 2,16$ ; для ВК30  $P = 0,04146 (h - hf)^{2,29}$ ,  $S = 2,08$ ; для T50T39H11  $P = 0,002311 (h - hf)^{2,08}$ ,  $S = 2,31$ . Зазвичай показник  $m = 1,2 - 2,0$ , але виявилось, що для досліджуваних твердих сплавів він більше 2. Літературні дані вказують на те, що  $m > 2$ , якщо матеріал був наклепаний під час індентування [9].

Індентування дозволяє визначити величину  $\sigma_{ind}$ , що має аналогічну природу з макроскопічною межею пружності та визначається як

$$\sigma_{ind} = E \cdot \varepsilon_{es}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{es} = \varepsilon_p \frac{h_s}{h_c}, \quad (2)$$

$$h_s = 0,75 P_{max} / S, \quad (3)$$

$$h_c = h_{max} - h_s, \quad (4)$$

$$\varepsilon_p = \ln \sin \gamma_2, \quad (5)$$

$$ctg\gamma_2 = ctg\gamma_1 - 1,77\varepsilon_e', \quad (6)$$

$$\varepsilon_e' = K_5 \cdot \left( \frac{h}{h_e} \left[ 1 + K_3 \left( \frac{h}{h_e} + \frac{h_H}{h_c} - 1 \right) \right]^{-1} \right) \cdot ctg\gamma_1 \cdot \frac{h_e}{h}, \quad (7)$$

де  $\varepsilon_{es}$  – величина пружної деформації у безконтактній області;  $\gamma_2$  – кут між віссю та гранню відновленого відбитка,  $\gamma_1 = 68^\circ$  – двогранний кут піраміди Вickers,  $\varepsilon_e'$  – пружна деформація контактної пари індентор-відбиток твердості,  $h_H$  – висота навалу, коефіцієнти  $K_5 = 0,35$  і  $K_3 = 1,35$  [5, 6, 7]. Величина  $\sigma_{ind}$  для сплавів наведена на рис. 2.

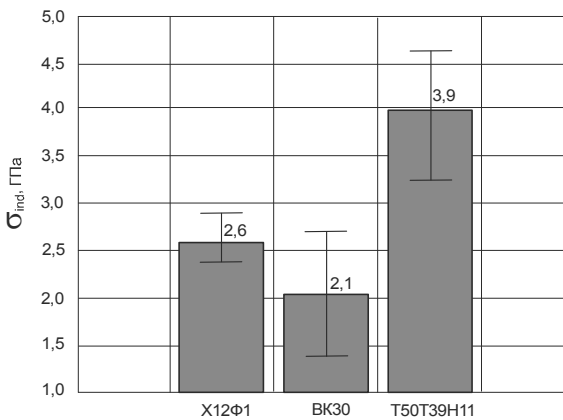


Рис. 2. Межа пружності при індентуванні  $\sigma_{ind}$ .

Відомо, що межа пружності характеризує напругу, вище якої в матеріалі з'являються перші ознаки пластичної деформації. Для сплаву T50T39N11  $\sigma_{ind}$  виявилася найвищою (3,9±0,7 ГПа), для X12Φ1  $\sigma_{ind} = 2,6 \pm 0,3$  ГПа, для BK30 – найнижчою (2,1±0,7 ГПа). Вірогідно, це пояснюється низькою твердістю кобальтової матриці сплаву BK30, яка набагато еластичніша за карбід. Але така поведінка характерна для мікроб'єму, тому що на макрорівні на поведінку сплаву впливає також карбід вольфраму.

Таким чином було встановлено, що сплав BK30 дисипує більшу частину переданої енергії, ніж сплав T50N39N11 і навіть сталь ( $W_{pl}/W_{зар} = 81,2\%$ ). Показники дисипованої енергії  $W_{pl}$  і  $W_{pl}/W_{зар}$  можуть бути використані для прогнозування стійкості сплавів: їх зростання вказує на підвищення експлуатаційних властивостей. Була розрахована межа пружності при індентуванні  $\sigma_{ind}$ , яка свідчить про те, що для деформування сплаву T50T39N11 треба прикласти максимальну напругу, сплаву BK30 – мінімальну, значення  $\sigma_{ind}$  для сталі X12Φ1 знаходиться на середньому рівні.

## Література

1. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. – 2004. – 19, 1. – P. 3 – 20.
2. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъемах, тонких приповерхностных слоях и плёнках // Физика твердого тела. – 2008. – 50, 12. – С. 2113 – 2142.

3. Головин Ю. И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикрообъемах (обзор) // Завод. лаб. – 2009. – 1 (75). – С. 45 – 59.
4. Дуб С.Н., Новиков Н. В., Мильман Ю. В. Метод определения модуля Юнга при упругом локальном деформировании поверхности образца // Завод. лаб. – 2005. – 3. – С. 42 – 48.
5. Milman Yu.V. Plasticity determined by indentation and theoretical plasticity of materials // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2009. – 73, 9. – P. 1215 – 1221.
6. Фирстов С. А. Уравнение индентирования // Доповіді НАНУ. – 2007. – 12. – С. 100 – 106.
7. Фирстов С.А. Новые методологические возможности определения механических свойств современных материалов методом автоматического индентирования / С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Э.П. Печковский // Наука та інновації. – 2010. – 6, 5. – С. 7 – 18.
8. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. Справ. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
9. Hutchings Ian M. The contribution of David Tabor to the science of indentation hardness // J. Mater. Res. – 2009. – 24, 3. – P. 581 – 589.

Одержано 19.12.13

**В. В. Пашинский, М. Г. Субботина, В. И. Закиев**

### **Способность инструментальных сплавов к диссипации энергии в микрообъемах**

#### **Резюме**

Определены энергетические показатели поведения стали X12Ф1, сплава ВК30 и порошкового сплава на основе TiC при кинетическом индентировании. Установлено, что сплав ВК30 диссипирует часть приложенной энергии, большую (81,2 %), чем сталь (75,4 %) или сплав на основе TiC (68,1 %). Рассчитан предел упругости при индентировании  $\sigma_{ind}$ , он составил  $3,9 \pm 0,7$  ГПа для сплава на основе TiC,  $\sigma_{ind} = 2,6 \pm 0,3$  ГПа для стали X12Ф1,  $2,1 \pm 0,7$  ГПа для ВК30, соответственно.

**V. V. Pashynsky, M.G. Subbotina, V.I. Zakiev**

### **Research of tool alloys ability to dissipate energy in microvolumes**

#### **Summary**

Energy characteristics of tool alloys were evaluated in case of X12Ф1 steel, carbide alloy 70 % WC-Co and 50 % TiC-NiTi by nanoindentation technic. It was proved that 70 % WC-Co alloy may dissipate far more energy (81,2 %) than steel (75,4%) or TiC based alloy (68,1%). Elastic strength  $\sigma_{ind}$  was determined and it was equal to  $3,9 \pm 0,7$  GPa for TiC based alloy,  $2,6 \pm 0,3$  GPa for steel and  $2,1 \pm 0,7$  GPa for 70 % WC-Co alloy, accordingly.