

Градiєнтність структури i характеристики руйнування сталевих виливкiв

Кондратюк С. Є., доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4978-6740>

Пархомчук Ж. В., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3026-8951>

Вейс В. І., молодший науковий співробітник, valentyneis@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8889-2303>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

На прикладі виливків сталей 25Л і 30ХГСЛ досліджено вплив перегрівів розплаву над рівноважним ліквідусом до температур 1570 °С, 1620 °С і 1670 °С та умов тепловідбору (звичайне і швидке охолодження) на формування градiєнтної структури і характеристики руйнування по перерізу виливків. Диференційований фазово-структурний стан прямокутних виливків (60х60х100 мм) забезпечувався переважанням одностороннім тепловідбором у ливарних формах з різною тепловідбіркою здатністю і середньою швидкістю охолодження (V_{ox}) 2 – 5 °С/с та 300 – 350 °С/с.

Встановлено закономірні зміни протяжності основних макроструктурних зон у виливках залежно від умов кристалізації, зокрема збільшення зони приповерхневих дрібних кристалів і зони транскристалізації при швидкісному охолодженні розплаву. Показано, що залежно від температурних умов підготовки розплаву і охолодження його при кристалізації розмір зерна по перерізу виливків змінюється на 4-5 номерів (сталь 25Л) і на 6-8 номерів (сталь 30ХГСЛ). Швидкісне охолодження розплаву при цьому зумовлює значне підвищення значень ударної в'язкості по перерізу виливків в межах 50-35 Дж/см² (сталь 25Л) і 40-20 Дж/см² (сталь 30ХГСЛ) навіть за умов значного перегріву розплаву. За умов же звичайного охолодження спостерігається значне зниження значень ударної в'язкості по перерізу виливків від 30 до 15 Дж/см².

За результатами визначення ударної в'язкості у виливках з диференційованою структурою залежно від умов кристалізації і температури випробування (+20 °С...-60 °С) одержані рівняння регресії щодо зміни її значень в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу, а також температури крихкості $T_{крх}^{50}$ сталей в об'ємі виливків.

Одержані результати створюють передумови розроблення технологічних засад інженерії литих сталевих виробів для забезпечення в них заданих властивостей згідно вимог їх експлуатації.

Ключові слова: сталь, кристалізація, градiєнтність структури, ударна в'язкість.

При виготовленні виробів машинобудування сучасні ливарні технології мають суттєві переваги порівняно з іншими технологіями формоутворення з використанням прокату і поковок сталей. Вони дозволяють реалізувати

можливості виготовлення виробів безпосередньо з розплаву при забезпеченні максимального зменшення припусків на механічну обробку. При цьому відкриваються перспективи цілеспрямованого впливу технологічних факторів на фазово-структурний стан і властивості литих виробів на всіх етапах їх виготовлення (підготовки розплаву, кристалізації, структуроутворення) з врахуванням конкретних умов експлуатації.

Проте в ряді випадків використання литих виробів обмежується у зв'язку з негативним впливом різнозернистості литої структури, проявів ліквіації, транскристалізації на опір їх крихкому руйнуванню. Зважаючи на це ливарники намагаються одержувати сталеві виливки з однорідною дрібною структурою і рівномірним розподілом властивостей по всьому перерізу виробів, що на практиці є технологічно складним завданням.

З іншого боку відомо про широке використання в машинобудуванні можливостей створення у виробах неоднорідних (градієнтних) фазово-структурних станів для забезпечення в них високої міцності поверхневих шарів і необхідної в'язкості глибинних об'ємів засобами хіміко-термічної обробки, поверхневого гартування, лазерного оплавлення тощо.

З огляду на це, технології лиття з використанням визначального впливу температурно-часових параметрів кристалізації, зокрема регламентованого спрямованого і швидкісного тепловідбору, певного температурного градієнту по перерізу виливків під час кристалізації і структуроутворення, відкривають нові можливості цілеспрямованого формування різних структурних станів в об'ємі виливків і одержання литих виробів з наперед заданим комплексом експлуатаційних властивостей. Про позитивний досвід таких підходів щодо прогнозування і підвищення конструкційної міцності, зносостійкості і ресурсу роботи литих виробів йдеться в роботах [1-5]. Проте системні дослідження і цьому напрямі відсутні.

Виходячи з цього в роботі досліджено вплив термодинамічних параметрів – перегріву розплаву і інтенсивності його охолодження при кристалізації – на формування макроструктурних зон та характеристики руйнування виливків сталей 25Л і 30ХГСЛ з градієнтною структурою.

Прямокутні виливки досліджуваних сталей розміром 60x60x100 мм одержували розливкою розплаву перегрітого до температур 1570 °С, 1620 °С і 1670 °С над рівноважним ліквідусом (для сталі 25Л $T_{\text{л}} = 1505$ °С, для сталі 30ХГСЛ $T_{\text{л}} = 1490$ °С) у ливарні форми з різною тепловідбіркою здатністю – піщані (звичайне охолодження $V_{\text{ох}} = 2 - 5$ °С/с) і мідні водоохолоджувані (швидке охолодження $V_{\text{ох}} = 300 - 350$ °С/с) за умов переважаючого одностороннього тепловідбору від торцевої частини виливків під час кристалізації. Для забезпечення спрямованого тверднення бокові поверхні форми, окрім тепловідвідної, були теплоізовані. Темплети і зразки для досліджень виготовляли з металу центральних частин виливків по повздовжній осі.

Металографічно встановлено формування основних макроструктурних зон по перерізу виливків – поверхневої дрібних рівноосних кристалів (I), зони транскристалізації з утворенням стовпчастих кристалів (II), перехідної

Структура, зношування, руйнування

зони розгалужених (III) і зони (IV) великих рівноосних кристалів. Протяжність їх закономірно змінюється залежно від термодинамічних умов кристалізації виливків (рис. 1). Так протяжність поверхневої зони виливків, зумовлена високим ступенем переохолодження розплаву і утворенням великої кількості зародків кристалізації при низькій швидкості їх росту, невелика проте дещо зростає відповідно ступеню перегріву розплаву і швидкості його охолодження в межах 0,5 – 2,0 мм (сталь 25Л) та 1,0 – 5,0 мм (сталь 30ХГСЛ). Формування зони транскристалізації (II) пов'язано з різким зменшенням переохолодження розплаву, що кристалізується і з переважаючою швидкістю росту кристалів у напрямку тепловідведення. За умов експерименту максимальна протяжність цієї зони до 26 мм (сталь 25Л) і 24 мм (сталь 30ХГСЛ) спостерігається при значному перегріві розплаву 1670 °С і швидкісному його охолодженні (рис. 1 в, г). Протяжність зони

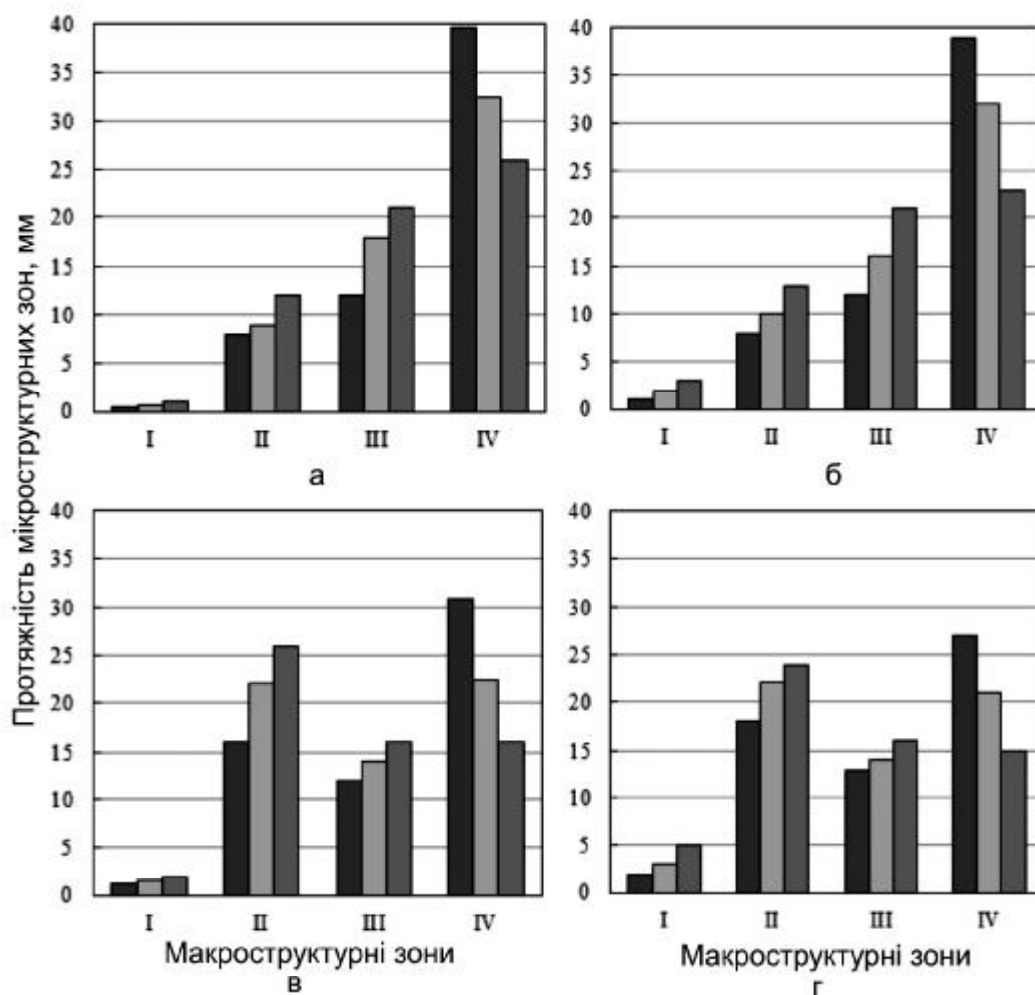


Рис. 1. Протяжність макроструктурних зон по перерізу виливків сталей за умов нормального (а, б) і швидкого (в, г) охолодження при кристалізації. ■ – температура розплаву перед розливкою 1570 °С, ■ – 1620 °С, ■ – 1670 °С.

Fig. 1. The length of macrostructural zones in the cross section of steel castings under conditions of normal (а, б) and rapid (в, г) cooling at crystallization. ■ – melt temperature before casting 1570 °C, ■ – 1620 °C, ■ – 1670 °C.

Структура, зношування, руйнування

розгалужених дендритів (III), що утворюються в умовах гальмування головних осей і росту бокових гілок внаслідок розвитку роздільної дифузії біля фронту кристалізації, в більшій мірі залежить і зменшується з підвищенням швидкості охолодження розплаву. Зони великих рівноосних кристалів (IV) набувають максимального розвитку до 40 мм за умов незначного перегріву 1570 °С і звичайної швидкості охолодження розплаву під час кристалізації.

Гradientність структури по перерізу досліджуваних виливків демонструє також зміна будови їх макрозломів (рис. 2) та розміру зерна (рис. 3) залежно від температурно-часових умов кристалізації сталей.

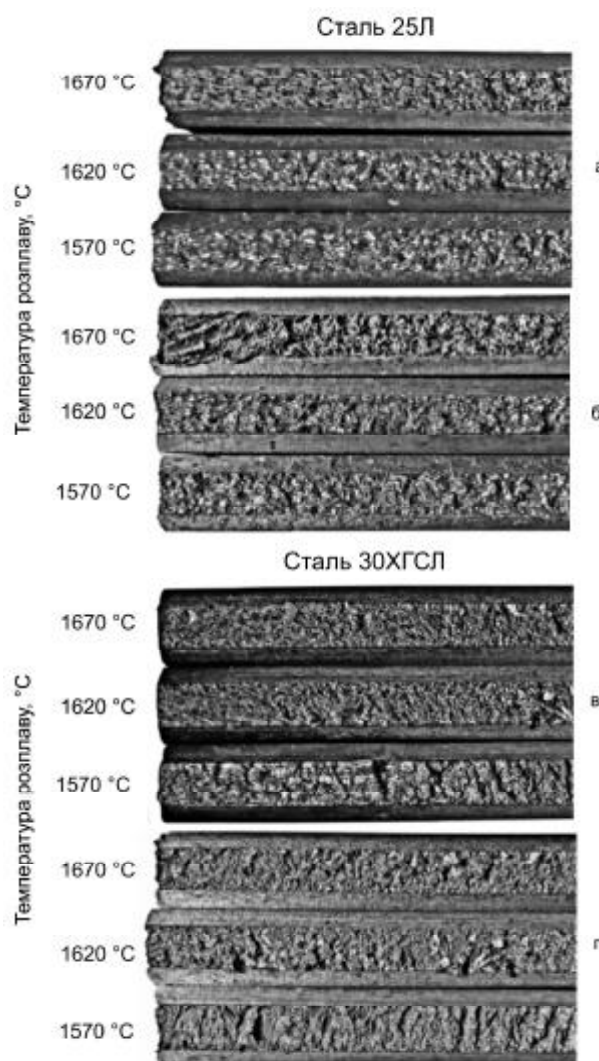


Рис. 2. Гетерогенність макрозломів по перерізу виливків залежно від температури перегріву розплаву і умов охолодження при кристалізації. а, в – швидке охолодження; б, г – нормальне охолодження.

Fig. 2. Heterogeneity of macrofractures in the cross section of castings depending on the temperature of the melt superheat and cooling conditions at crystallization. а, в – fast cooling; б, г – normal cooling.

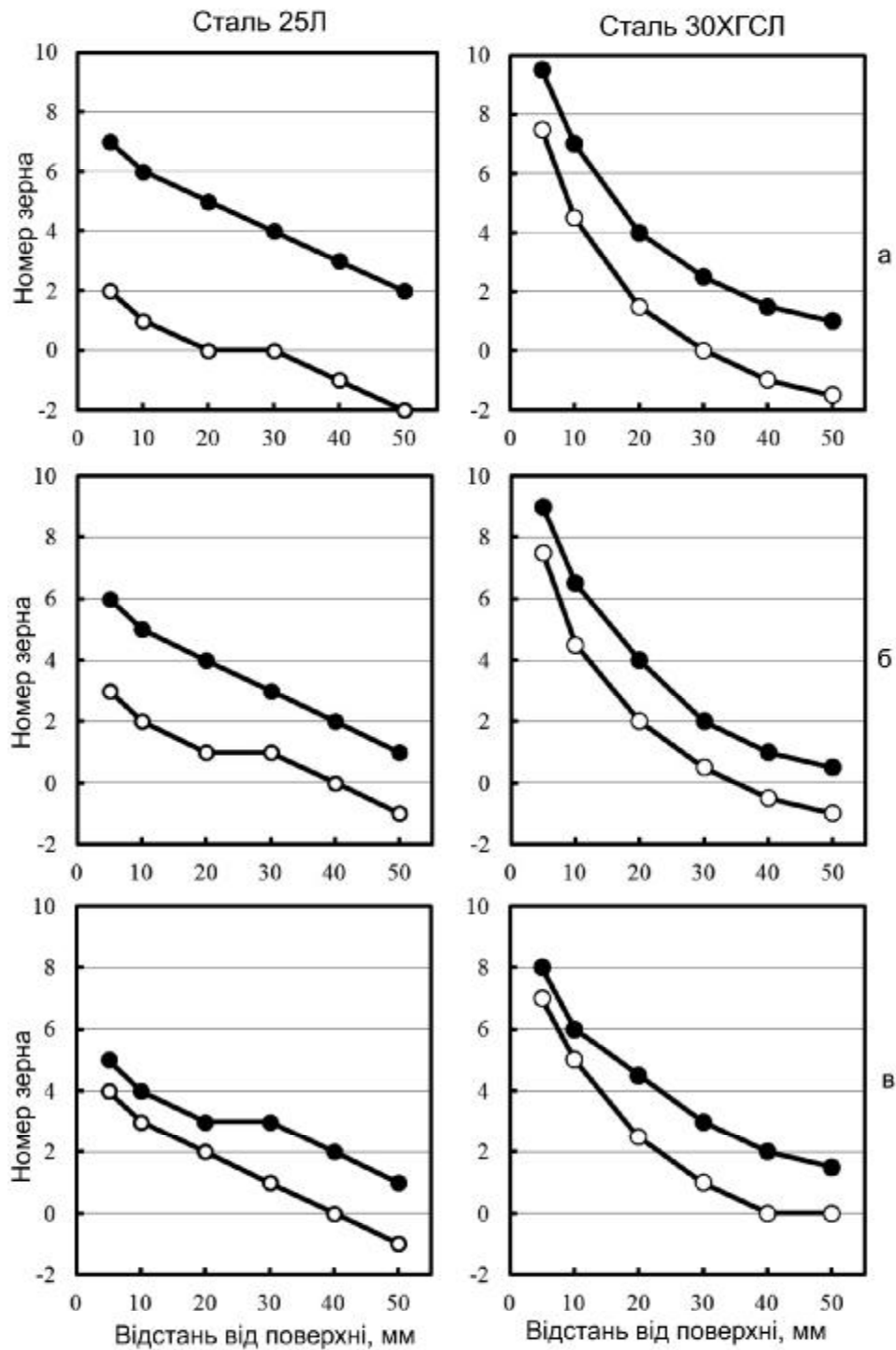


Рис. 3. Розмір зерна по перерізу виливків сталей залежно від умов кристалізації. а – температура розплаву 1670 °С, б – 1620 °С, в – 1570 °С. ● – швидке охолодження, ○ – нормальне охолодження.

Fig. 3. The grain size in the cross section of steel castings depending on the crystallization conditions. а – melt temperature 1670 °C, б – 1620 °C, в – 1570 °C. ● – fast cooling, ○ – normal cooling.

Структура, зношування, руйнування

Щодо останнього, то максимальна дисперсність зерна (ДСТУ 8972:2019) досягається в поверхневих об'ємах виливків за умов швидкого охолодження і значного перегріву розплаву до 1670 °С. По мірі віддалення від охолоджуваної поверхні виливків розмір зерна збільшується в середньому на 4-5 номерів (сталь 25Л) і на 6-8 номерів (сталь 30ХГСЛ).

За умов звичайного охолодження і значного перегріву розплаву спостерігається значне збільшення розміру зерна у виливках сталей в цілому, а також по глибині виливків в середньому на 4 номери (сталь 25Л) і на 6 номерів (сталь 30ХГСЛ).

Така диференційованість структурного стану виливків створює реальні передумови суттєвих відмінностей щодо їх опору крихкому руйнуванню в різних структурних зонах литих виробів залежно від ступеня перегріву розплаву та інтенсивності тепловідбору під час його кристалізації. За результатами визначення ударної в'язкості на стандартних зразках з надрізом Менаже по перерізу виливків сталей у зв'язку з впливом досліджуваних умов кристалізації і математичної обробки експериментальних даних засобами регресійного аналізу [6] одержані рівняння змін її значень в межах досліджуваного факторного простору, де T – температура розплаву, °С; d – відстань від поверхні виливка, мм; R – множинний коефіцієнт кореляції.

Зміну значень ударної в'язкості (Дж/см²) за умов звичайного охолодження виливків під час кристалізації описують рівняння:

$$KCU \text{ (Сталь 25Л)}, \text{ Дж/см}^2 = -2500.8239987462 + 3.4687619048 \cdot d + 3.1203999984 \cdot T - 0.0028571429 \cdot d^2 - 0.0022 \cdot d \cdot T - 0.00096 \cdot T^2, R^2 = 0.99; \quad (1)$$

$$KCU \text{ (Сталь 30ХГСЛ)}, \text{ Дж/см}^2 = -458.395999691 - 2.276952381 \cdot d + 0.6945999996 \cdot T - 0.0064285714 \cdot d^2 + 0.0013 \cdot d \cdot T - 0.00024 \cdot T^2, R^2 = 0.97; \quad (2)$$

Зміну значень ударної в'язкості у виливках швидкого охолодження при кристалізації описують рівняння:

$$KCU \text{ (Сталь 25Л)}, \text{ Дж/см}^2 = 2823.667998517 + 0.7085714286 \cdot d - 3.5257999982 \cdot T - 0.0021428571 \cdot d^2 - 0.0005 \cdot d \cdot T + 0.00112 \cdot T^2, R^2 = 0.99; \quad (3)$$

$$KCU \text{ (Сталь 30ХГСЛ)}, \text{ Дж/см}^2 = -497.0933330822 - 2.4106666667 \cdot d + 0.6619999997 \cdot T - 0.0033333333 \cdot d^2 + 0.0012 \cdot d \cdot T - 0.0002 \cdot T^2, R^2 = 0.98; \quad (4)$$

Графічна інтерпретація цих залежностей (рис. 4) свідчить про суттєвий вплив високої швидкості охолодження розплаву, навіть за значних температур його перегріву, на підвищення значень ударної в'язкості по всьому перерізу виливків сталей. За цих умов кристалізації рівень ударної в'язкості по мірі віддалення від охолоджуваного торця виливків сталі 25Л знижується в межах 50-35 Дж/см², а сталі 30ХГСЛ в межах 40-20 Дж/см². За умов же звичайного охолодження розплаву показник ударної в'язкості значно нижчий і змінюється по перерізу виливків обох сталей від 30 до 15 Дж/см².

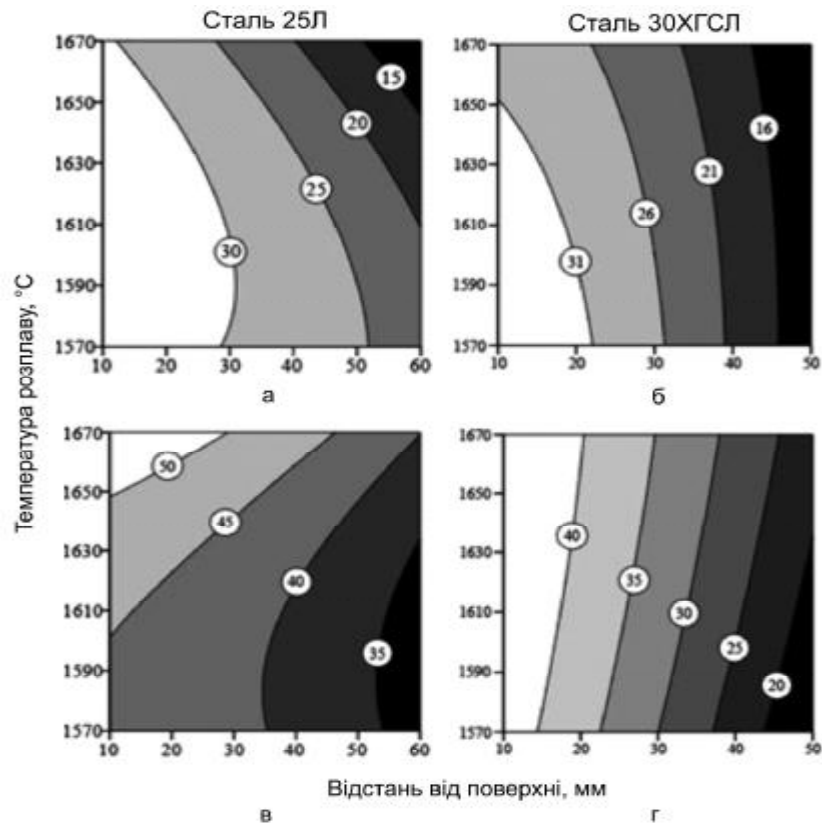


Рис. 4. Зміна ударної в'язкості (KCU, Дж/см²) по перерізу виливків сталі залежно від температури перегріву і швидкості охолодження розплаву. а, б – нормальне охолодження; в, г – швидке охолодження.

Fig. 4. Change in toughness (KCU, J/cm²) in the cross section of steel castings depending on the superheat temperature and cooling rate of the melt. а, б – normal cooling; в, г – rapid cooling.

Встановлені зміни значень ударної в'язкості корелюють зі змінами зеренної структури виливків (рис. 3) і узгоджуються з сучасними уявленнями щодо зв'язку дисперсності структури з перерозподілом внеску в енергоємність руйнування складових ударної в'язкості – роботи зародження і роботи поширення тріщини [7-9]. Поєднання в сталях з дисперсною структурою високої міцності і ударної в'язкості пов'язано саме із значними витратами енергії на поширення тріщини при ударних випробуваннях.

Слід відзначити також прояви анізотропії показників ударної в'язкості з підвищенням її значень в середньому до 30 % в зоні транскристалізації (II) у напрямі перпендикулярному до спрямованого тепловідбору.

Значна кількість фазово-структурних неоднорідностей, спричинених умовами кристалізації, тверднення і структуроутворення може відігравати визначальну роль у забезпеченні певного ресурсу і надійності в експлуатації литих сталевих виробів, реалізації того чи іншого механізму їх руйнування. Виходячи з цього досліджено зв'язок температурно-часових параметрів

кристалізації і структуроутворення виливків з градієнтною структурою на характеристики їх руйнування в температурному інтервалі в'язко-крихкого переходу.

Оцінку опору крихкому руйнуванню (холодостійкості) у виливках сталей здійснювали за результатами серіальних випробувань на ударну в'язкість згідно ГОСТ 9454-78 в інтервалі температур від +20 °С до –60 °С. В якості охолоджувального середовища у термостаті використовували суміш «сухого льоду» і денатурованого етилового спирту. Критичну температуру крихкості при цьому визначали по зниженню значень ударної в'язкості на 50 % і волокнистої складової у структурі мікррозломів досліджуваних ударних зразків [10].

Одержані, за результатами випробувань і множинного регресійного аналізу, рівняння описують зміни ударної в'язкості по перерізу виливків сталей залежно від умов кристалізації, температури випробування (Т, °С), відстані від охолоджуваної поверхні виливків (d, мм) і різних ступенів перегріву розплаву (1570, 1620, 1670 °С).

Для виливків сталі 25Л швидкого охолодження

$$KCU \text{ (1570 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 39.7585714286 - 0.139 \cdot d + 0.5356428571 \cdot T - 0.002 \cdot d^2 - 0.00015 \cdot d \cdot T + 0.0014285714 \cdot T^2, R^2 = 0.95; \quad (5)$$

$$KCU \text{ (1620 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 48.8985714286 - 0.2215714286 \cdot d + 0.3266428571 \cdot T - 0.0008571429 \cdot d^2 - 0.00065 \cdot d \cdot T - 0.0025714286 \cdot T^2, R^2 = 0.99; \quad (6)$$

$$KCU \text{ (1670 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 61.0971428571 - 0.4537142857 \cdot d + 0.1302857143 \cdot T + 0.0034285714 \cdot d^2 + 0.0008 \cdot d \cdot T - 0.0056428571 \cdot T^2, R^2 = 0.99; \quad (7)$$

Для виливків сталі 25Л звичайного охолодження

$$KCU \text{ (1570 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 32.7314285714 - 0.2737142857 \cdot d + 0.3308571429 \cdot T - 0.0005714286 \cdot d^2 - 0.0024 \cdot d \cdot T - 0.0014285714 \cdot T^2, R^2 = 0.98; \quad (8)$$

$$KCU \text{ (1620 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 25.16 - 0.1477142857 \cdot d + 0.427 \cdot T - 0.0015714286 \cdot d^2 - 0.0026 \cdot d \cdot T + 0.00125 \cdot T^2, R^2 = 0.98; \quad (9)$$

$$KCU \text{ (1670 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 22.2214285714 - 0.2095714286 \cdot d + 0.4523571429 \cdot T + 0.0001428571 \cdot d^2 - 0.00275 \cdot d \cdot T + 0.0023214286 \cdot T^2, R^2 = 0.99; \quad (10)$$

Для виливків сталі 30ХГСЛ, що кристалізувались в умовах швидкого охолодження одержано рівняння:

$$KCU \text{ (1570 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 47.7085714286 - 0.5 \cdot d + 0.1341428571 \cdot T - 0.004 \cdot d^2 - 0.0016 \cdot d \cdot T - 0.0008214286 \cdot T^2, R^2 = 0.97; \quad (11)$$

$$KCU \text{ (1620 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 47.64 - 0.4777142857 \cdot d + 0.13 \cdot T - 0.0025714286 \cdot d^2 - 0.0006 \cdot d \cdot T - 0.0005 \cdot T^2, R^2 = 0.97; \quad (12)$$

$$KCU \text{ (1670 } ^\circ\text{C)}, \text{ Дж/см}^2 = 49.9671428571 - 0.4575714286 \cdot d + 0.0837857143 \cdot T - 0.0028571429 \cdot d^2 + 0.00055 \cdot d \cdot T - 0.0006428571 \cdot T^2, R^2 = 0.99; \quad (13)$$

Для виливків сталі 30ХГСЛ, що кристалізувались в умовах звичайного охолодження:

KCU (1570 °C), Дж/см² = 35.17 – 0.433·d + 0.4435·T – 0.001·d² – 0.00595·d·T + 0.00125·T², R² = 0.96; (14)

KCU (1620 °C), Дж/см² = 32.1271428571 – 0.403·d + 0.4097857143·T – 0.001·d² – 0.00465·d·T + 0.0013571429·T², R² = 0.97; (15)

KCU (1670 °C), Дж/см² = 31.0871428571 – 0.2992857143·d + 0.3277857143·T – 0.0034285714·d² – 0.00465·d·T – 0.0006428571·T², R² = 0.97; (16)

Графічні інтерпретації наведених рівнянь регресії (рис. 5, рис. 6) свідчать про те, що максимальний рівень значень ударної в'язкості досягається у поверхневих об'ємах виливків з високою дисперсністю литої структури, характерною для обох досліджуваних режимів охолодження розплаву.

Підвищення температури перегріву розплаву в межах 1570 °C – 1670 °C зумовлює, в разі його швидкого охолодження при кристалізації, суттєве підвищення показників ударної в'язкості сталей по перерізу виливків у всьому інтервалі температур випробування (+20 °C... –60 °C) від 46-56 Дж/см² до 6-21 Дж/см² (сталь 25Л) і від 42-43 Дж/см² до 14-19 Дж/см² (сталь 30ХГСЛ).

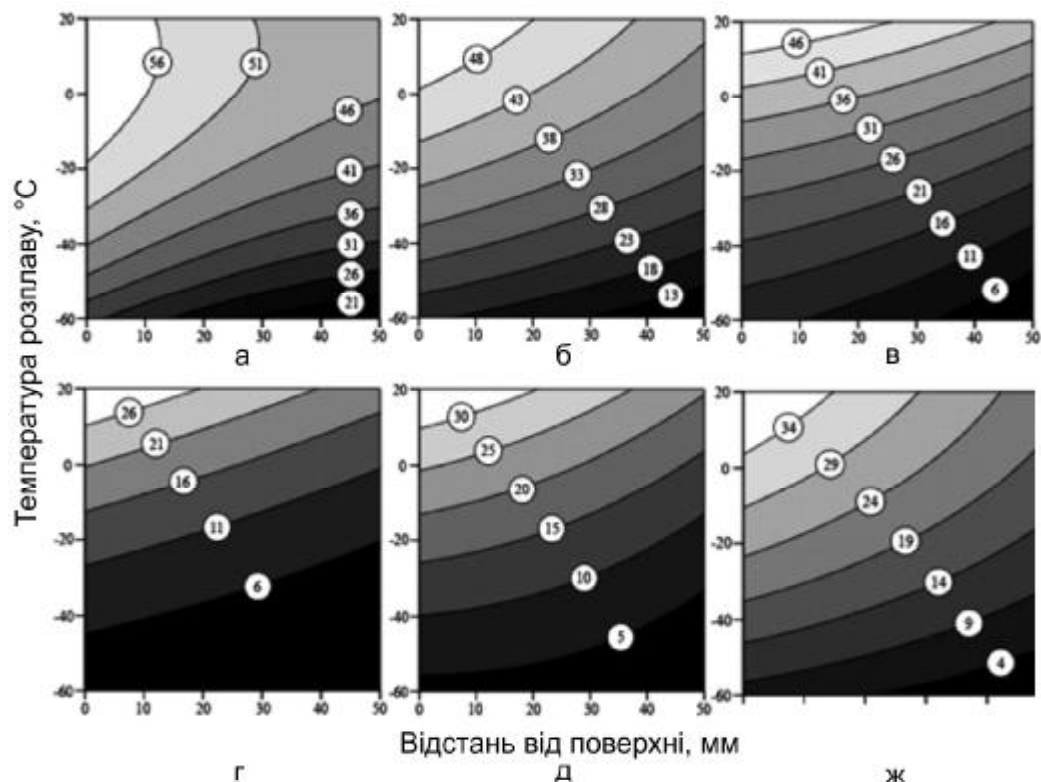


Рис. 5. Зміна ударної в'язкості (KCU, Дж/см²) по перерізу виливків сталі 25Л в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу. а, б, в – швидке охолодження, г, д, ж – нормальне охолодження; температура розплаву 1670 °C (а, г), 1620 °C (б, д), 1570 °C (в, ж).

Fig. 5. Change in toughness (KCU, J/cm²) in the cross section of steel castings 25L in the temperature range of ductile-brittle transition. а, б, в – rapid cooling, г, д, ж – normal cooling; melt temperature 1670 °C (а, г), 1620 °C (б, д), 1570 °C (в, ж).

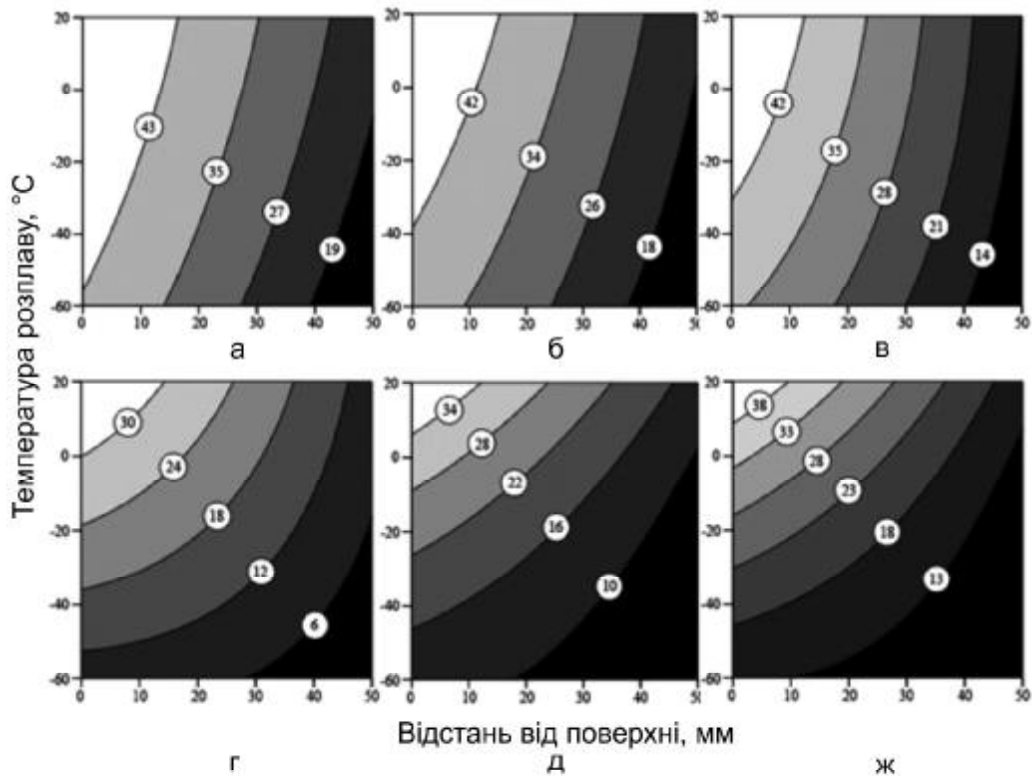


Рис. 6. Зміна ударної в'язкості (KCU, Дж/см²) по перерізу виливків сталі 30ХГСЛ в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу. а, б, в – швидке охолодження, г, д, ж – нормальне охолодження; температура розплаву 1670 °C (а, г), 1620 °C (б, д), 1570 °C (в, ж).

Fig. 6. Change in toughness (KCU, J/cm²) on the cross section of steel castings 30HGSL in the temperature range of ductile-brittle transition. а, б, в – rapid cooling, г, д, ж – normal cooling; melt temperature 1670 °C (а, г), 1620 °C (б, д), 1570 °C (в, ж).

В разі ж звичайного охолодження і нормального перегріву розплаву до 1570 °C максимальні значення ударної в'язкості в різних об'ємах виливків за тих же температурних умов випробування змінюються в межах 34-4 Дж/см² (сталь 25Л) і 38-13 Дж/см² (сталь 30ХГСЛ).

Фрактографічними дослідженнями показано, що макрозломи сталей у поверхневих макроструктурних зонах виливків характеризуються тонкою кристалічною будовою, яка поступово набуває більш грубого рельєфу з утворенням великих блискучих фасеток по мірі зниження температури випробування і переходу до центральних об'ємів виливків.

Мікрорельєф зломів досліджуваних сталей представлено поверхнями в'язкого ямкового руйнування, квазівідколу, крихкого внутрішнього і міжзеренного руйнування (рис. 7).

Кількісна електронно-фрактографічна оцінка гетерогенності мікрозломів [10, 11] ударних зразків з різних макроструктурних зон виливків звичайного і швидкого охолодження при кристалізації дозволила встановити закономірні зміни механізмів руйнування від в'язкого внутрішньозеренного до менш енерговитратних механізмів руйнування – квазівідколу і крихкого транс- та інтеркристалітного відколу і кількісного співвідношення

Структура, зношування, руйнування

структурних складових мікрозлому в температурному інтервалі в'язко-крижого переходу залежно від умов кристалізації і визначити температурний поріг холодноламкості $T_{\text{крх}}^{50}$ сталей у виливках.

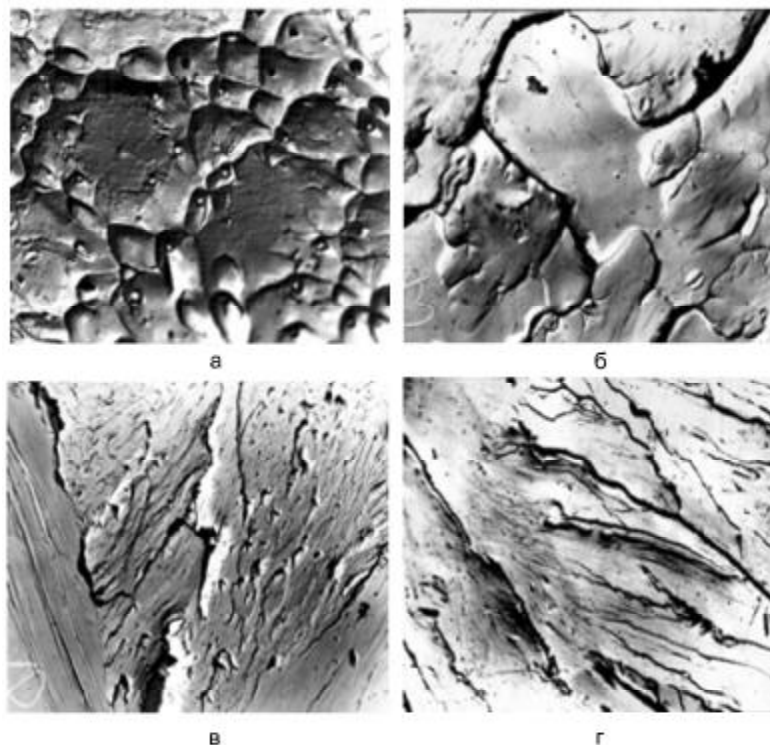


Рис. 7. Мікрорельєф зломів сталі 25Л в інтервалі температур в'язко-крижого переходу. а – в'язкий ямковий; б – квазівідкол; в, г – транскристалітний відкол крижого руйнування. ПЕМ, $\times 6000$.

Fig. 7. Microrelief (track pattern) of 25L steel fractures in the range of ductile-brittle transition temperatures. а – viscous pit; б – quasi-split; в, г – transcrystallite fragmentation of brittle fracture. TEM, $\times 6000$.

Зміни цього показника залежно від умов багатофакторного експерименту описують наступні рівняння регресії, де T – температура розплаву, d – відстань від поверхні виливка, мм.

Для виливків сталі 25Л звичайного охолодження:

$$T_{\text{крх}}^{50} = -252.983999784 + 0.4023999997 \cdot T - 4.8373333333 \cdot d - 0.00016 \cdot T^2 + 0.0032 \cdot T \cdot d; R^2 = 0.99 \quad (17)$$

сталі 25Л швидкого охолодження:

$$T_{\text{крх}}^{50} = -558.9493330021 + 0.7055999996 \cdot T + 1.0737142857 \cdot d - 0.00024 \cdot T^2 - 0.0004 \cdot T \cdot d + 0.0052380952 \cdot d^2; R^2 = 0.99 \quad (18)$$

Для виливків сталі 30ХГСЛ звичайного охолодження:

$$T_{\text{крх}}^{50} = -519.5626663473 + 0.6995999996 \cdot T - 2.5264761905 \cdot d - 0.00024 \cdot T^2 + 0.0018 \cdot T \cdot d - 0.0023809524 \cdot d^2; R^2 = 0.99 \quad (19)$$

сталі 30ХГСЛ швидкого охолодження:

$$T_{\text{крх}}^{50} = -367.4133330611 + 0.5279999997 \cdot T - 1.8331428571 \cdot d - 0.0002 \cdot T^2 + 0.0018 \cdot T \cdot d - 0.009047619 \cdot d^2; R^2 = 0.99 \quad (20)$$

Графічна інтерпретація цих залежностей (рис. 8) свідчить про визначальну роль підвищення швидкості охолодження розплаву під час кристалізації на зниження порогу крихкості $T_{крх}^{50}$ вдвічі порівняно з нормальними умовами охолодження. Показано також закономірні зміни цієї характеристики по перерізу виливків сталі 25Л при цьому від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, та виливків сталі 30ХГСЛ від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

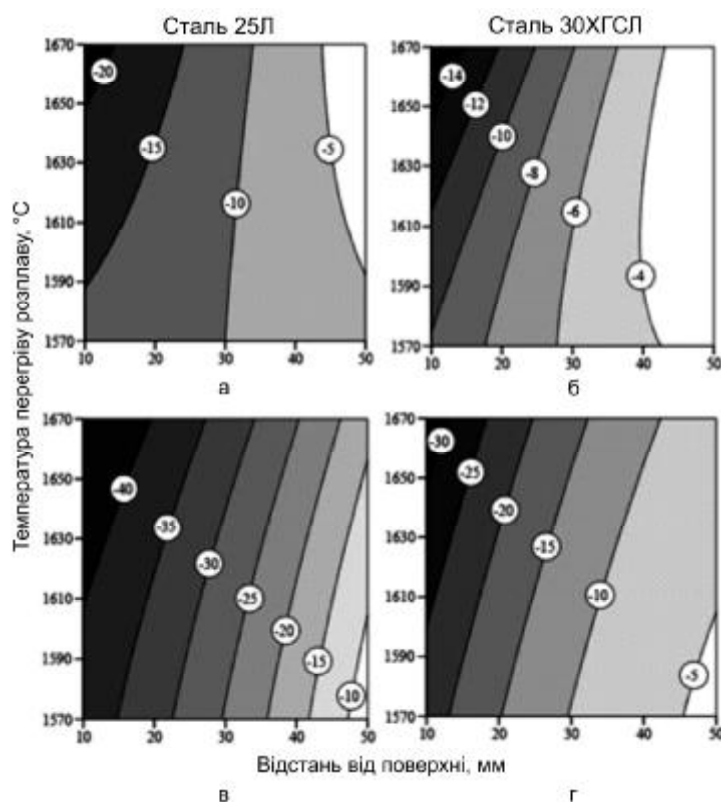


Рис. 8. Зміна порогу холодоламкості ($T_{крх}^{50}$, $^{\circ}\text{C}$) сталей залежно від умов кристалізації. а, б – нормальне охолодження; в, г – швидке охолодження.

Fig. 8. Changing the threshold of cold brittleness ($T_{крх}^{50}$, $^{\circ}\text{C}$) of steels depending on the crystallization conditions. а, б – normal cooling; в, г – rapid cooling.

Таким чином встановлені закономірності зміни характеристик руйнування (KCU , $T_{крх}^{50}$) у різних макрооб'ємах виливків сталей, залежно від термодинамічних параметрів їх кристалізації, створюють передумови розроблення технологічних засад інженерії литих сталевих виробів для забезпечення необхідних прогнозованих властивостей з врахуванням умов їх експлуатації.

Література

1. Тарасевич М. І. Прогнозування структурних зон виливка на базі теплофізичних досліджень // Металознавство та обробка металів. – 1996. – № 4. – С. 61-63.

2. Стась І. М. Структуроутворення та властивості сталевих виливків в умовах регламентованого тепловідбору: Автореферат дис. канд. техн. наук. – Київ: ФТІМС НАН України, 2014. – 23 с.
3. Кириевский Б. А., Трубаченко Л. Н., Александрова Е. Н. Влияние направленной кристаллизации на структуру и износостойкость хромистых чугунов // Литейн. пр-во. – 2020. – № 4. – С. 8-10.
4. Багмутов В. П., Захаров И. Н. Моделирование градиентных структурных состояний в стальном слитке в ходе затвердевания // Изв. Вузов. Черная металлургия, 2003. – № 3. – С. 28-33.
5. Кондратюк С.Є., Вейс В.І., Пархомчук Ж.В., Локтіонов-Ремізовський В.А. Структура і зношування градієнтних сталевих виливків // Металознавство та обробка металів. – 2021. – № 4. – С. 16-23.
6. Сербер Дж. Линейный регрессионный анализ / пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 272 с.
7. Petch N. J. The ductile-brittle transition in the fracture of alpha-iron. // Phil. mag. – 1958. – 3. – P. 1089. <https://doi.org/10.1080/14786435808237038>.
8. Петч Н. Дж. Переход из вязкого состояния в хрупкое в α -железе. – В кн.: Атомный механизм разрушения. – М.: Металлургиздат., 1963. – С. 69-83.
9. Мешков Ю. Я., Котречко С. А., Шиян А. В. Механическая стабильность металлов и сплавов. – Киев. – Наук. думка, 2014. – 278 с.
10. Бялік О. М., Кондратюк С. Є., Кіндрачук М. В., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. – К.: Політехніка, 2006. – 328 с.
11. Фрактография и атлас фрактограмм. Справ. / Под ред. М. Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1982. – 498 с.

References

1. Tarasevych M. I., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 1996, No. 4, pp. 61-63 [in Ukrainian].
2. Stas I. M. *Strukturoutvorenniya ta vlastyvosti stalevykh vylyvkiv v umovakh rehlementovanoho teplovidboru* (Structural formation and properties of steel castings in the conditions of regulated heat selection), Avtoreferat dys. kand. tekhn. Nauk, Kyiv: FTIMS NANUkrayiny, 2014, 23 p. [in Ukrainian].
3. Kyryevskyy B. A., *Lyteynoe proizvodstvo*, 2020, No., pp. 8-10 [in Russian].
4. Bahmutov V. P., Zakharov Y. N., *Yzvestiya Vuzov. Chernaya metallurhiya*, 2003, No. 3, pp. 28-33 [in Russian].
5. Kondratyuk S. Ye., Veys V. I., Parkhomchuk Z. V., Loktionov-Remizovskyy V.A., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2021, No. 4, pp. 16-23 [in Ukrainian].
6. Serber J. *Lyneyyny rehressyonnyy analiz* (Linear regression analysis), Moscow: Myr, 1980, 272 p. [in Russian].
7. Petch N. J. The ductile-brittle transition in the fracture of alpha-iron., *Phil. mag.*, 1958, No. 3, p. 1089. <https://doi.org/10.1080/14786435808237038>. [in English].
8. Petch N. J. *Perekhod yz vyazkoho sostoyaniya v khrupkoe v a-zheleze*. – V kn.: *Atomnyy mekhanizm razrusheniya* (Atomic mechanism of destruction), Moscow: Metallurhyzdat, 1963, pp. 69-83. [in Russian].
9. Meshkov Yu.Y., Kotrechko S. A., Shyyan A. V. *Mekhanicheskaya stablynost metallov y splavov* (Mechanical stability of metals and alloys), Kyev, Nauk. dumka, 2014, 278 p. [in Ukrainian].

10. Byalik O. M., Kondratyuk S. Ye., Kindrachuk M.V., Chernenko V.S. *Strukturnyy analiz metaliv. Metalohrafiya. Fraktohrafiya* (Structural analysis of metals. Metallography. Fractography), Kyiv: Politekhnik, 2006, 328 p. [in Ukrainian].
11. *Fraktohrafiya y atalas fraktohramm. Sprav.* (Fractography and atlas of fractograms. Cases.), Pod red. M. L. Bernshteyna, Moscow: Metallurhiya, 1982, 498 p.

Одержано 13.12.21

Kondratyuk S.Ye., Parkhomchuk Z.V., Veis V.I.

Gradient structure and fracture characteristics of steel castings

Summary

The effect of melt overheating over the equilibrium liquidus to temperatures of 1570 °C, 1620 °C and 1670 °C and heat removal conditions (normal and rapid cooling) on the formation of a gradient structure and fracture characteristics over the cross section of castings of 25L and 30HGSL steels was investigated. The differentiated phase-structural state of rectangular castings (60x60x100 mm) was provided by the predominant one-sided heat removal in foundry molds with different heat removal capacity and average cooling rate 2 – 5 °C/s and 300 – 350 °C/s.

Regular changes in the length of the main macrostructural zones in castings are established depending on the crystallization conditions, in particular, an increase in the zone of near-surface small crystals and the transcrystallization zone during rapid cooling of the melt. It is shown that depending on the temperature conditions of melt preparation and cooling during crystallization, the grain size in the cross section of castings varies by 4-5 numbers (steel 25L) and by 6-8 numbers (steel 30HGSL). The rapid cooling of the melt causes a significant increase in the impact strength of the cross section of the castings in the range of 50-35 J/cm² (steel 25L) and 40-20 J/cm² (steel 30HGSL), even under conditions of significant overheating of the melt. Under normal cooling conditions, there is a significant decrease in the values of impact strength in the cross section of the castings from 30 to 15 J/cm².

According to the results of determining the toughness in castings with differentiated structure depending on the crystallization conditions and test temperature (+20 °C... -60 °C) the regression equation for changing its values in the range of viscous-brittle transition temperatures and brittleness temperature (T_{brtl}^{50}) of steels in the volume of castings.

The obtained results create preconditions for the development of technological principles of engineering of cast steel products to ensure the specified properties in accordance with the requirements of their operation.

Keywords: steel, crystallization, gradient structure, toughness.