

Вплив слідів хитання і режимів осциляції кристалізатора на якість поверхні безперервнолитих заготовок

О. М. Смірнов, доктор технічних наук, професор
С. В. Куберський*, кандидат технічних наук, професор
А. В. Головчанський*, О. П. Верзілов
О. В. Антикуз**, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Донбаський державний технічний університет, Алчевськ

**Донецький національний технічний університет, Донецьк

Розглянуто механізм формування слідів хитання на поверхні безперервнолитої заготовки та пов'язаних з ними підповерхневих гребінців. Проаналізовано вплив слідів хитання і різних режимів осциляції кристалізатора на якість безперервнолитих заготовок.

Одним з основних прийомів, що сприяють досягненню високої якості поверхні і підповерхневих зон безперервнолитих заготовок, є контроль процесів, що відбуваються в кристалізаторі і поведінки металу в районі меніску, які значною мірою впливають на формування слідів хитання.

Стабілізація умов витягування заготовки з кристалізатора здійснюється шляхом його зворотньо-поступального руху, що мінімізує сили тертя, а також покращує умови подачі змащення (масла або шлакоутворювальної суміші) в зазор між заготовкою і робочою поверхнею кристалізатора. При цьому певні відхилення від раціональних параметрів лиття та умов тверднення можуть призводити не тільки до утворення дефектів, але і до аварійних ситуацій типу «прорив» і «обрив» заготовки в процесі лиття [1].

Незважаючи на той факт, що концепція зворотньо-поступального руху кристалізатора використовується вже понад півстоліття, у практиці розливання сталі, як і раніше, не існує єдиних теоретичних критеріїв та методик щодо вибору раціональних амплітудно-частотних характеристик стосовно конкретних умов безперервного розливання [2 – 4].

Насьогодні найбільш поширеним режимом руху кристалізатора для сортових МБЛЗ є синусоїдний закон зміни швидкості. Але завдяки бурхливому розвитку систем автоматичного управління в 90-х роках ХХ століття і введенню їх у виробничу сферу, стало можливим широке використання гідравлічних механізмів хитання [5 – 8], які дозволяють здійснювати більш плавне регулювання параметрів хитання за змін, які можуть виникати в процесі розливання, а також реалізовувати більш широкий діапазон технологічних параметрів [9, 10].

Плавлення і кристалізація

Дані, отримані в ході різних промислових випробувань, показали, що реалізація несинусоїдного (триангулярного) режиму хитання за допомогою гідروприводу, помітно зменшує глибину слідів хитання в порівнянні з синусоїдним режимом [11 – 13].

Метою даної роботи був розвиток уявлень про механізм формування слідів хитання на поверхні сортової безперервнолитної заготовки та оцінка впливу триангулярного режиму осциляції кристалізатора на її якість.

На першому етапі досліджень з використанням холодної моделі (рис. 1), що імітує тверднення скоринки металу в кристалізаторі, було проведено фізичне моделювання, яке дозволило візуалізувати механізм утворення та зростання дендритів, гребінців, що заглиблюються в тіло зливка, а також слідів хитання на поверхні зливка.

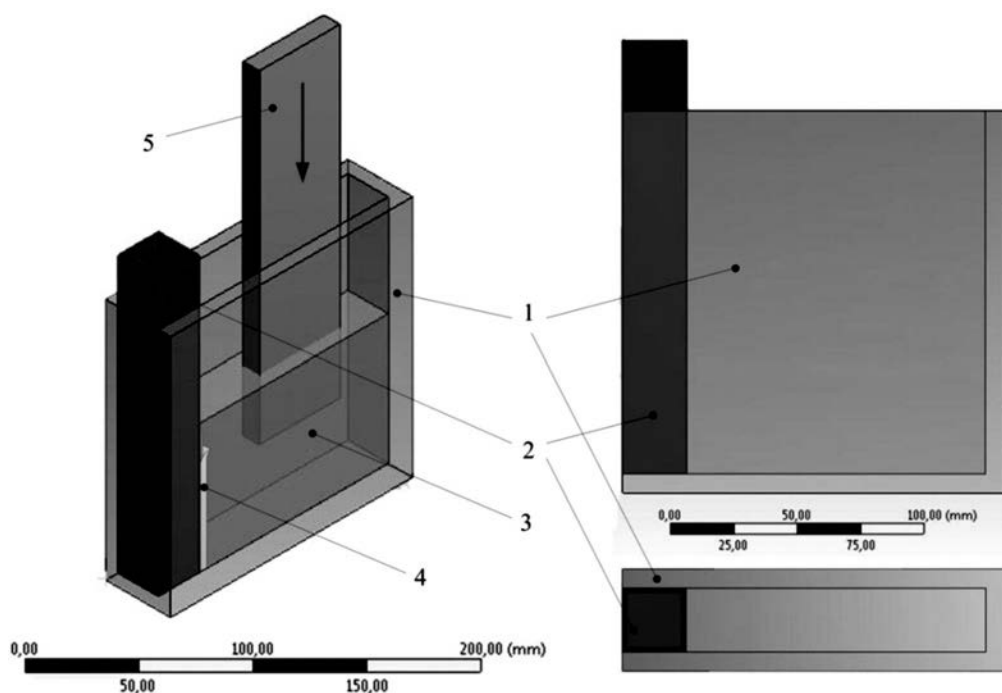


Рис. 1. Фізична модель для моделювання формування слідів хитання. 1 – стінки з оргскла, 2 – алюмінієвий охолоджуваний профіль, 3 – рідкий камфен, 4 – закристалізована скоринка камфена, 5 – занурюваний стрижень.

Три стінки фізичної моделі виконані з оргскла, а четверта представляла собою з'ємний алюмінієвий профіль, виконаний з можливістю водяного охолодження для поліпшення тепловідведення від розплаву, що кристалізується, і забезпечення максимальної подібності моделі з реальним об'єктом. В якості модельної речовини використовували камфен, що дозволяє моделювати процеси дендритного росту кристалів і явища, які відбуваються в двофазній зоні [14].

Дослідження проводили в наступній послідовності:

- камфен розігрівали на паровій бані до температури $38 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- охолоджуваний водою алюмінієвий профіль поміщали в

Плавлення і кристалізація

холодильник для охолодження до температури $(-10) - (-15) ^\circ\text{C}$ з метою збільшення інтенсивності тепловідведення від модельної рідини під час проведення експериментів;

– стінки моделі, виконані з органічного скла, підігрівали галогенними лампами (до температури $32 - 33 ^\circ\text{C}$) для запобігання намерзання камфену на них і забезпечення можливості візуального спостереження та відеофіксації процесу кристалізації модельної речовини на алюмінієвій стінці;

– в підготовлену для роботи модель вставляли охолоджений алюмінієвий профіль і швидко заливали камфен, після чого фіксували товщину і конфігурацію зростаючої скоринки;

– через $60 - 65$ с, коли тверда скоринка камфену зростала до $1,5 - 2,0$ мм, здійснювали переливання рідкого камфену через затверділий меніск шляхом підвищення рівня розплаву в моделі за рахунок занурення в нього стрижня з оргскла.

Область сліду хитання може мати підвищену забрудненість неметалевими включеннями [15]. Пов'язано це з тим, що рідкий шлак, який знаходиться на меніску не встигає повністю спливати під час переливання, і захоплюється закристалізованою скоринкою металу. За подальшого витягання заготовки неоднорідність поверхневого шару, що викликана подібним забрудненням, може призвести до появи поперечних тріщин по слідах хитання, необхідності зачистки поверхні заготовок перед прокаткою, а в гіршому випадку – прориву металу.

На рис. 2 показані фрагменти формування двох слілів хитання в процесі моделювання. Встановлено, що на дугоподібній поверхні рідкого меніска відбувається кристалізація скоринки, яка після переливання утворює гребінець, що заглиблюється в тіло сформованого зливка.

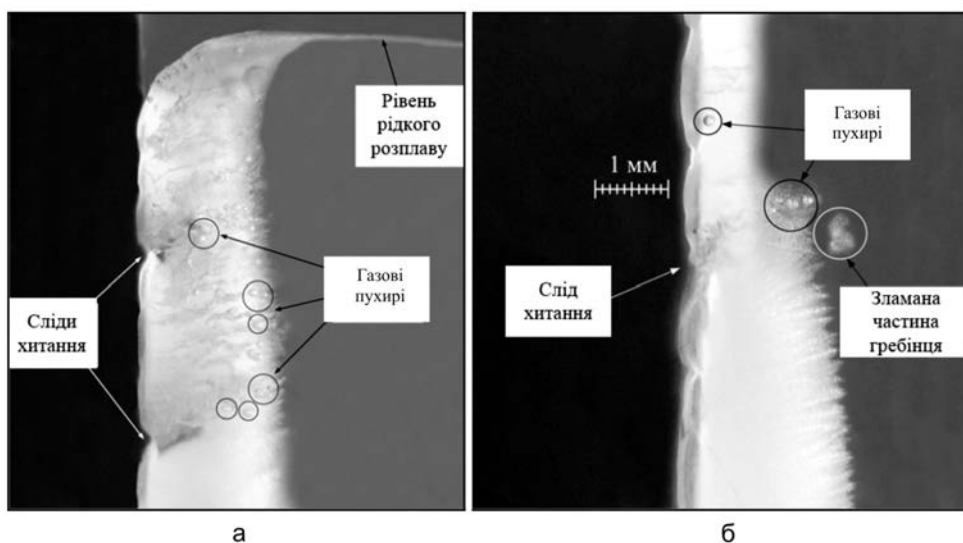


Рис. 2. Фрагменти формування слілів хитання.

При подальшому твердненні гребінець може підплавлятися висхідними потоками рідкого камфену, або обламуватися (рис. 2 б). Зламана

частина гребінця переплавляється або переміщується в нижні шари розплаву, де може бути захоплена зростаючими гілками дендритів.

Як було зазначено вище, сліди хитання і пов'язані з ними гребінці, значно погіршують якість поверхні і підповерхневого шару заготовок. В роботі [15] зазначено, що область сліду хитання може бути насичена неметалічними включеннями і газовими пухирями. Пухирі газу, спливаючі з глибини розплаву, можуть концентруватися в районі гребінця і далі залишатися у поверхневому шарі заготовки, знижуючи тим самим однорідність металу і його якість.

Одним з факторів, що впливають на якість поверхневого шару заготовки, є рівень перегріву сталі в кристалізаторі, за підвищення якого зменшується глибина проникнення гребінців в результаті зниження швидкості кристалізації меніска і його підплавлення більш гарячим розплавом.

Для дослідження впливу величини перегріву камфену на глибину проникнення гребінця було проведено 45 дослідів, в яких температура модельної речовини була на 2 – 6 °С (крок 0,5 °С) вище температури ліквідусу. Перегрів нижче 2 °С призводить до намерзання камфену не тільки на алюмінієвій охолоджуваній поверхні, але і на стінках з оргскла, що не дозволяє використовувати її для експериментів. За перегріву в діапазоні 4,5 – 6,0 °С спостерігалось незначне виділення з камфену пухирів газу, які під час спливання можуть застрягати в районі гребінця і в зростаючих гілках дендритних кристалів, що імітує утворення неоднорідної структури металу (рис. 3). Менш грубі гребінці характерні для більш гарячого розплаву, що пояснюється зниженням швидкості кристалізації в районі меніску.

У процесі росту кристалів, під дією гідродинамічних потоків і усадочних процесів можуть з'являтися міждендритні тріщини (рис. 4 а), які в подальшому призводять до обламування деяких дендритів. Уламки дендритів переплавляються або стають новими центрами кристалізації, опускаючись вглиб зливка (рис. 4 б, в). Також можна спостерігати обламування частини гребінця під дією циркуляційних потоків, що виникають при імітації переливання розплаву через меніск (рис. 4 д) і зростання дендритних кристалів на верхній межі зануреного в обсяг розплаву гребінця (рис. 4 в – е).

На другому етапі роботи в умовах конвертерного цеху ПАТ «Єнакіївський металургійний завод» (ККЦ ВАТ «ЄМЗ»), де функціонують дві 6-ти струмкові сортові радіальні МБЛЗ, були проведені дослідження впливу несинусоїдного режиму хитання кристалізатора на глибину утворюваних слідів хитання і якість поверхні безперервнолитих сортових заготовок.

У ході проведених експериментів були випробувані різні параметри хитання кристалізатора під час отримання сортових заготовок перетином 150x150 мм зі сталі марки Ст5 (табл. 1) і відібрано по одному темплету (всього 4) з місць заготовок з найбільш характерним станом поверхні.

Дослідження якості поверхні темплетів проводили індикатором годинникового типу «ИЧ-10», який призначений для вимірювання лінійних

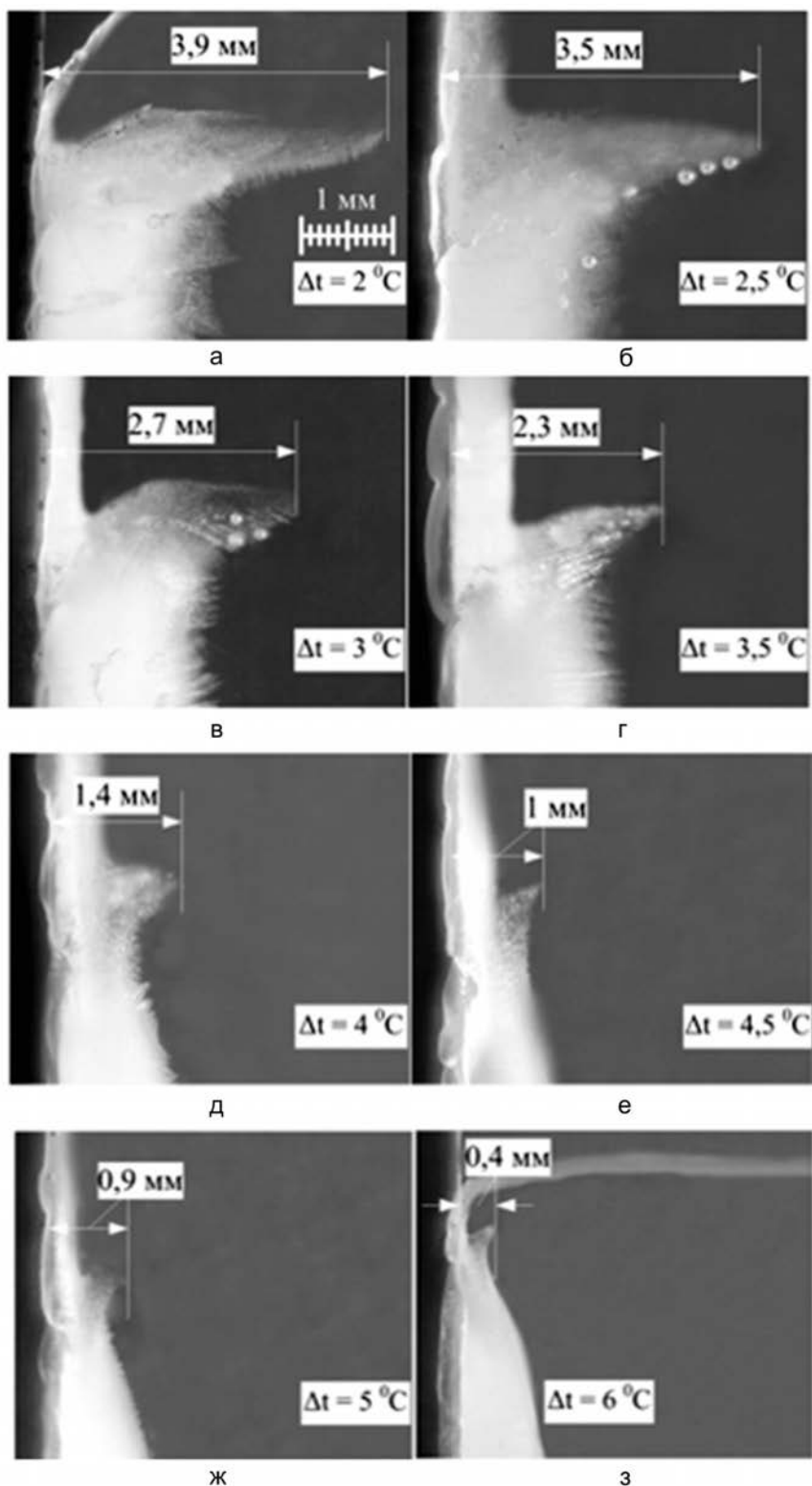


Рис. 3. Глибина проникнення гребінця в тіло зливка (а – з) в залежності від величини перегріву камфену ($\Delta t = 2 - 6$ °C).

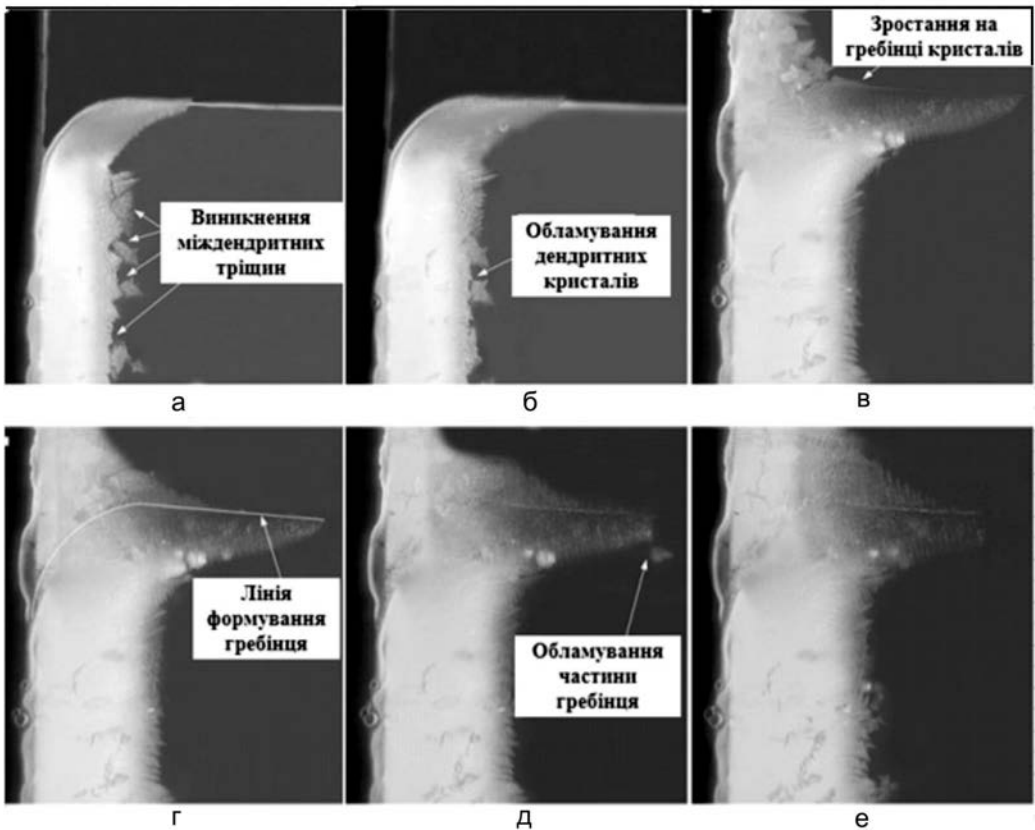


Рис. 4. Поведінка дендритів і гребінця в процесі кристалізації модельного розплаву.

Таблиця 1

Параметри розливання досліджених заготовок

Номер темплетга	Швидкість розливання, м/хв	Основні параметри хитань кристалізатора			
		Механізм хитання	Амплітуда хитання, мм	Частота хитання, хв ⁻¹	Коефіцієнт несинусоїдальності
1	2,5 – 2,7	механіка	5,5	107	–
2	2,5 – 2,7	гідравліка	5,5	146	0,5
3	2,5 – 2,7	гідравліка	4,5	190	0,6
4	2,5 – 2,7	гідравліка	4,8	205	0,7

розмірів абсолютним і відносним методами, визначення величини відхилень від заданої геометричної форми і взаємного розташування поверхонь. Вимірювання здійснювали по довжині темплетів через кожен міліметр поверхні. Початкова точка поверхні приймалася нульовою, всі наступні визначали відхиленням вище або нижче нуля.

Візуальний огляд показав, що посередині темплетів найбільш помітні сліди хитання кристалізатора (рис. 5), які практично не доходять до кутів. Крім того на відстані приблизно 10 мм від кута помітно наявність ужимин, які не можуть бути пов'язані з режимом хитання. Ширина ужимин становить

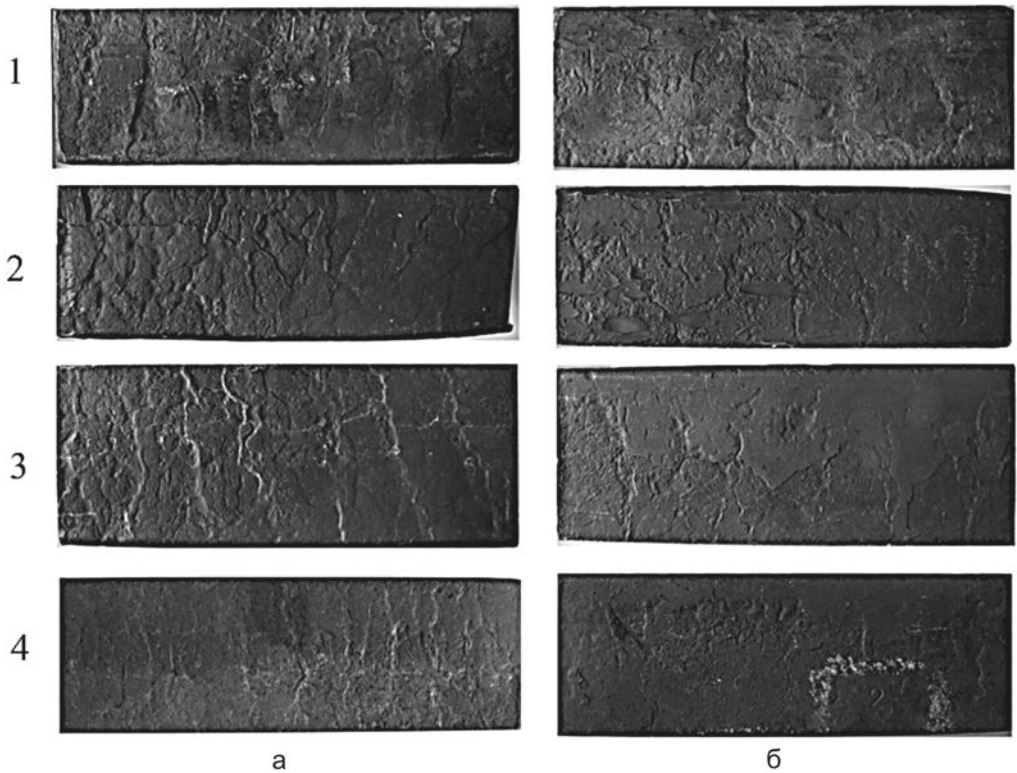


Рис. 5. Два боки сусідніх граней досліджуваних темплетів. 1 – 4 – номери темплетів, а – б – боки темплетів «А» та «Б», відповідно.

15 – 20 мм. Тому визначення нерівностей поверхні здійснювали для боків «А» (бік малого радіусу) і «Б» по лініях, паралельних куту темплету, що знаходяться на відстані 10 мм і 28 мм від нього.

Крім того, було виміряно профіль найбільш виразних слідів хитання від кута темплету до його середини по боку «А» на різній відстані від початку темплету (табл. 2, рис. 6).

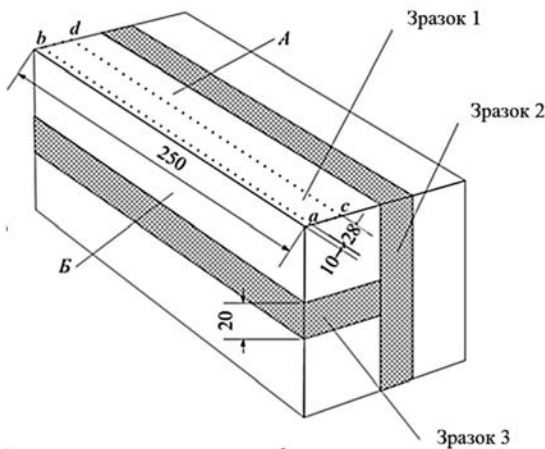


Рис. 6. Схема відбору зразків.

Дані табл. 2 свідчать про те, що для четвертого темплету відібраного від заготовки, розлитої з амплітудою хитання 4,8 мм, частотою 205 хв^{-1} і коефіцієнтом несинусоїдальності 0,7 характерний найбільш рівний профіль поверхні. Для темплетів № 1 і № 2, які було розлито з використанням електромеханічного та гідравлічного механізмів хитання при зворотно-поступальному русі кристалізатора за синусоїдальним законом, поверхня має більш виражені нерівності. Аналогічні

Плавлення і кристалізація

Таблиця 2

Результати заміру профілю досліджених темплетів

Номер темплетета		1-й				2-й			
Лінія вимірювання		ab		cd		ab		cd	
Бік темплетета		A	B	A	B	A	B	A	B
Лінійне відхилення $\alpha \cdot 10^2$, мм	min	-30	-27	-69	-10	-10	0	-21	0
	max	34	14	44	51	99	107	56	97
Амплітуда нерівностей $\beta \cdot 10^2$, мм		64	41	113	61	109	107	77	97
Номер темплетета		3-й				4-й			
Лінія вимірювання		ab		ab		ab		ab	
Бік темплетета		A	B	A	B	A	B	A	B
Лінійне відхилення $\alpha \cdot 10^2$, мм	min	-51	-32	-13	-30	-36	-13	-41	-26
	max	44	40	37	17	23	56	25	42
Амплітуда нерівностей $\beta \cdot 10^2$, мм		95	72	50	47	59	69	66	68

результати характерні і для слідів хитання, нерівність яких для темплетів № 3 і № 4 має амплітуду 1,1 мм і 0,7 мм, а № 1 і № 2 1,68 мм і 1,6 мм відповідно.

В цілому отримані результати свідчать про те, що розливання заготовок з використанням гідравлічного приводу і триангулярного закону хитання кристалізатора дозволяє знизити глибину слідів хитання на 35 – 60 %, поліпшити якість поверхні і вихід придатного безперервнолітої заготовки на 0,4 – 0,6 % (абсолютних відсотка).

Література

1. Madias J. Minimization of surface defects on bars and wire rod originate din billet casting // Proceedings 4th European Continuous Casting Conference. – Birmingham, 2002. – P. 821 – 829.
2. The Making, Shaping and Treating of Steel - Casting Volume / Edited by A.Cramb. – Pittsburgh, PA (The AISE Steel Foundation), 2003. – 1017 p.
3. Irving W.R. Continuous Casting of Steel. – London: The Institute of Materials, 1993. – 207 p.
4. Wolf M. Mold Oscillation Guidelines // Steelmaking Conference Proceedings. – Warrendale: ISS – AIME, 1991. – P. 51 – 71.
5. Alvarez de Toledo G. Mould Strand Interaction During Continuous Casting // Proceedings 3-rd European Continuous Casting Conference. – Madrid, 1998. – P. 543 – 551.
6. Darle T. Hydraulic Oscillation of the CC Slab Mold at Sollac Florange. First Industrial Results, Future Developments // Steelmaking Conference Proceedings. – Warrendale: ISS – AIME, 1993. – P. 209 – 218.
7. Fuchs W., Lemgen S., Roelofs H. Effects of oscillation waveform on the surface quality of SBQ-billets: experiences with hydraulic oscillators at Von Moos Stahl AG //

- Proceedings 4th European Continuous Casting Conference. – Birmingham, 2002. – P. 405 – 414.
8. Szekeres E.S. Overview of mold oscillation in continuous casting // Iron and Steel Engineer. – 1996. – № 6. – P. 29 – 37.
 9. Suzuki M. Development of new mold oscillation mode for high-speed continuous casting of steel slabs // ISIJ International. – 1991. – 31, № 3. – P. 254 – 261.
 10. Schwerdtfeger K. Depth of oscillation marks forming in continuous casting of steel // Metallurgical and materials transactions B. – 2000. – 31 B, № 4. – P. 813– 819.
 11. Howe A. Stewart Reduction of reciprocation marks by high frequency vibration of the continuous casting mold // Steelmaking Conference Proceedings. – Warrendale: ISS-AIME, 1987. – 70. – P. 417 – 428.
 12. Yasunaka H. Improvement of surface quality of continuously cast steel by high cycle mold oscillation // Steelmaking Conference Proceedings. – Warrendale: ISS-AIME, 1986. – 69. – P. 497 – 502.
 13. Sung-KwangKim. Improvement of slab subsurface quality by change of casting parameters in continuous-cast ultra-low-carbon steel // SEASIS. – 2007. – 36, № 3. – P. 64 – 68.
 14. Смирнов А.Н. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ // Процессы литья. – 2009. – № 1. – С. 33 – 42.
 15. Sengupta J. A New Mechanism of Hook Formation during Continuous Casting of Ultra-low Carbon Steel Slabs // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2006. – 37 A, № 5. – P. 1597 – 1611.

Одержано 17.07.15

**А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, А. В. Головчанский,
А. П. Верзилов, О. В. Антикуз**

**Влияние следов качания и режимов осцилляции кристаллизатора на
качество поверхности непрерывнолитой заготовки**

Резюме

Рассмотрен механизм формирования следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки и связанных с ними подповерхностных гребешков. Проанализировано влияние следов качания и различных режимов осцилляции кристаллизатора на качество непрерывнолитых заготовок.

**A. N. Smirnov, S. V. Kuberskiy, A. V. Golovchanskiy,
A. P. Verzilov, O. V. Antyikuz**

**Influenced by of oscillation and parameters of oscillations of the
mold on the surface quality of continuous casting ingots**

Summary

Clarify the mechanism of formation of the next swing on the surface of continuous casting ingot an associated subsurfaces callops. Analyzed the influence of trace sofs wing and various parameter oscillations of the mold on the billet quality.