

Фізичне моделювання процесу обтиснення безперервнолитих слябів та блюмів під час їх кристалізації

О. М. Смірнов, доктор технічних наук, професор

С. В. Куберський*, кандидат технічних наук, професор

М. Ю. Проценко*, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ
*Донбаський державний технічний університет, Лисичанськ

Проведено фізичне моделювання процесу обтискування безперервнолитих заготовок під час їх кристалізації. Встановлено залежності ступеня випинання ливарної корки від зміни кількості твердої фази та інтенсивності обтискування, товщини корки від часу твердіння, а також характер зміни коефіцієнта кристалізації модельної речовини. Показано вплив частки твердої фази, ступеня та інтенсивності обтискування, а також конструкції кристалізатора на утворення тріщин та випинання заготовок під час їх обтискування.

Найважливішими питаннями виробництва безперервнолитої заготовки в сучасних умовах є підвищення її якості, зниження енергоємності виробництва та собівартості, що забезпечить високий рівень конкурентоспроможності готової продукції на внутрішньому та світовому ринках. Крім того, основною тенденцією розвитку техніки та технології процесу безперервного розливання для більшості інтегрованих підприємств залишається прагнення підвищити продуктивність існуючих машин безперервного лиття (МБЛЗ) шляхом збільшення швидкості розливання сталі за умови збереження або підвищення рівня фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей безперервнолитої заготовки. Тому дослідження, спрямовані на обґрунтування та вдосконалення технологічних параметрів процесу безперервного розливання сталі, які впливають на стабільність лиття, якість заготовки та продуктивність МБЛЗ є актуальними і мають наукову та практичну значимість.

Вирішення проблем, пов'язаних із поліпшенням якості поверхневих і підповерхневих шарів заготовки та зменшенням її собівартості, може бути здійснено шляхом глибокого теоретичного та експериментального аналізу процесів, що супроводжують тверднення сталі в зоні вторинного охолодження (ЗВО) МБЛЗ та їх впливу на якість заготовки і продуктивність машини в цілому. Особливо це стосується осьової ліквіації і пористості, розвиток яких досить сильно впливає на якісні показники безперервнолитого металу та залежить від технологічних параметрів розливання, умов і ступеня деформації заготовки у ЗВО.

Плавлення і кристалізація

Починаючи з кінця 80-х років минулого століття для поліпшення структури сортових заготовок, блюнів та слябів застосовують термічне, статичне та динамічне (м'яке) їх обтискування на заключній стадії кристалізації. В останні роки при розливанні заготовок великої товщини (сляби та блюми) з вуглецевих сталей на високій швидкості найбільше поширення отримав метод «м'якого» обтискування. Сутність його полягає в тому, що не повністю затверділа безперервнолита заготовка (обсяг рідкої фази складає 30 – 70 %) піддається додатковому обтискуванню (на декілька міліметрів) в нижній частині ЗВО шляхом регулювання сегментів (зазорів між роликками) за допомогою гідравлічних пристроїв. Така технологія дозволяє компенсувати об'ємну усадку сталі під час її твердіння, сприяє значному зниженню осьової пористості, V-подібної осьової ліквідації, підвищенню щільності металу і подрібненню первинного зерна при одночасному підвищенні однорідності кристалічної структури [1 – 3].

«М'яке» обтискування безперервнолитої заготовки повинно здійснюватися на строго визначеній ділянці, розташованій в кінцевій частині лунки рідкого металу між двома порогамі проникності двофазної зони (рис. 1). Перший поріг або «межа виливаємості» характеризує початок труднощів, пов'язаних з підживленням рідким розплавом двофазної зони і настає при наявності 0,80 – 0,65 рідини у двофазній зоні заготовки. При досягненні відносного вмісту рідини 0,30 – 0,20 опір течії розплаву стає настільки високим, що підживлення двофазної зони вже неможливе, що відповідає другому порогу проникності або «межі живлення». Місце знаходження меж цієї ділянки залежить від хімічного складу сталі, швидкості витягування заготовки з кристалізатора, інтенсивності вторинного охолодження заготовки, тобто багато в чому визначається конструктивними особливостями МБЛЗ. Величина обтискування диференціюється по сортаменту розливаного металу, особливо в залежності від вмісту вуглецю, який впливає на усадку металу в процесі кристалізації.

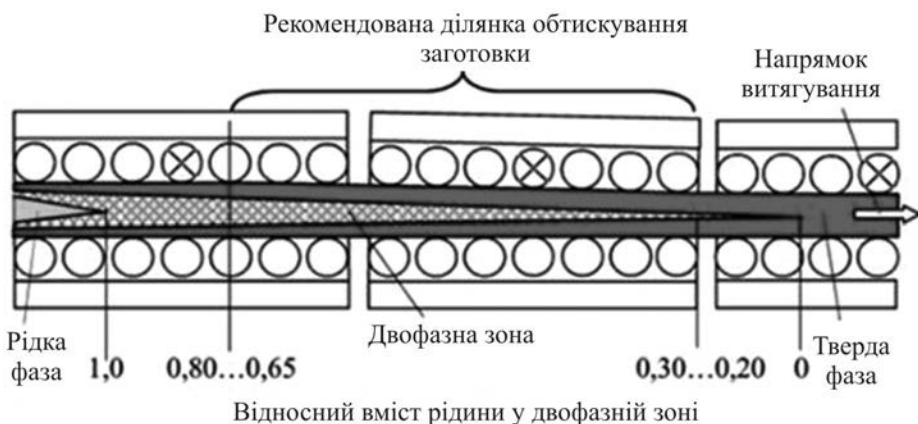


Рис. 1. Схематичне зображення фазового стану безперервнолитої заготовки та місця прикладання «м'якого» обтискування.

Насьогодні встановлення оптимальних параметрів обтискування, таких як інтенсивність та ступінь деформації, характер її здійснення (в

Плавлення і кристалізація

один або більше етапів, статичне, динамічне (м'яке) чи термічне і місце прикладання, конструкція обладнання, яке використовується, а також визначення їх впливу на якість безперервнолитої заготовки – є актуальними питаннями. Це потребує проведення глибоких фундаментальних досліджень, розвитку теорії та технології процесу безперервного розливання.

Розвинути теоретичні уявлення про механізм впливу «м'якого» обтискування на якість металу, а також уточнити основні технологічні параметри його реалізації можна з використанням методів фізичного моделювання процесів, які мають місце в двофазній області за умови деформації безперервнолитої заготовки з частково закристалізованою серцевиною, що і було основною задачею досліджень, результати яких розглянуті в представленій роботі.

Для моделювання процесу м'якого обтискування безперервнолитого злитка виготовлено лабораторну установку (рис. 2), яка представляла собою поперечний переріз слябу перетином 220 x 700 мм. Стінки моделі були виготовлені з пустотілого алюмінієвого профілю 25 x 25 мм і встановлені на склі товщиною 6 мм. Для охолодження в кожній грані профілю розміщено патрубки для підведення і відведення охолоджуючої води $\varnothing 6$ мм. Для реалізації обтискування конструкція моделі передбачала можливість пересування широких граней між вузькими за допомогою упору і гвинтового механізму, який дозволяв здійснювати обтискування по одній грані до 40 мм з кроком 0,1 мм. За допомогою підпружинених упорів здійснювалось більш сильне притиснення вузьких граней до широких і виключалось утворення зазорів у кутах. Для запобігання кристалізації модельної речовини на склі

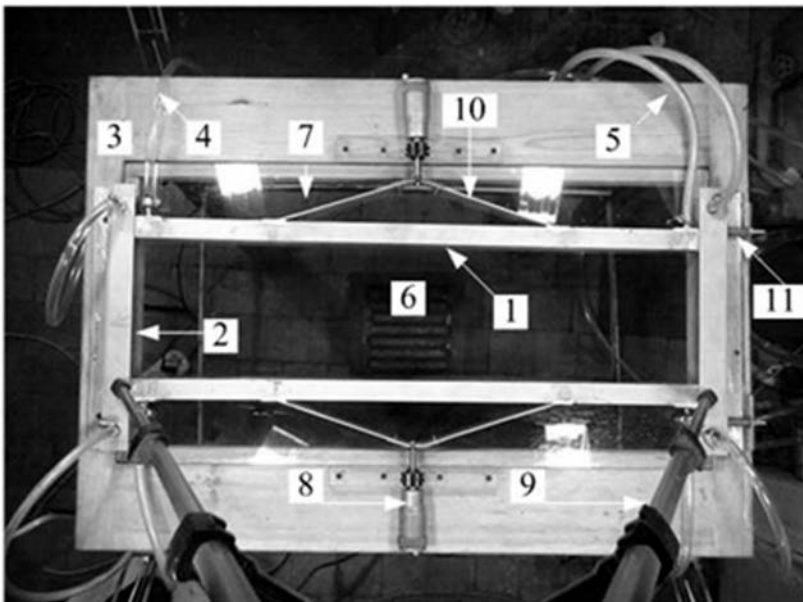


Рис. 2. Установка для фізичного моделювання методу «м'якого» обтискування безперервнолитої сляба: 1, 2 – широка і вузька грані кристалізатора, 3 – підставка, 4, 5 – шланги для підведення та відведення води, 6 – електрична плитка, 7 – скло, 8 – пристрій для обтискування, 9 – штатив для відеокамери, 10 – упор для рівномірного обтискування; 11 – підпружинені упори.

Плавлення і кристалізація

використовували електричну плиту і фен для прогріву місць небажаної кристалізації.

Для фізичного моделювання «м'якого» обтискування слябів використовували модель і методику, що описані в роботах [4 – 6]. Дослідження проводили з використанням камфену, який кристалізувався за дендритною схемою при частці твердої фази 30 – 70 %, витраті охолоджуючої води на кожну грань 1,125 л/хв, інтенсивності обтискування 6 і 12 мм/хв, а також за різного ступеня обтискування.

На першому етапі досліджень вивчено характер кристалізації модельної речовини і особливості утворюваної під час твердіння структури, а також коефіцієнт та швидкість кристалізації (рис. 3, 4). Показано (рис. 3), що характер кристалізації модельної речовини та утворювана структура її твердої фази є достатньо близькими до процесів, які супроводжують кристалізацію сталі. Під час кристалізації камфену спостерігається утворення дендритної структури, а в об'ємі рідини утворюються різноорієнтовані кристали. Результати, представлені на рис. 4, свідчать про зміну швидкості та коефіцієнту кристалізації залежно від часу від початку заливання камфену



Рис. 3. Структура модельної речовини під час тверднення.

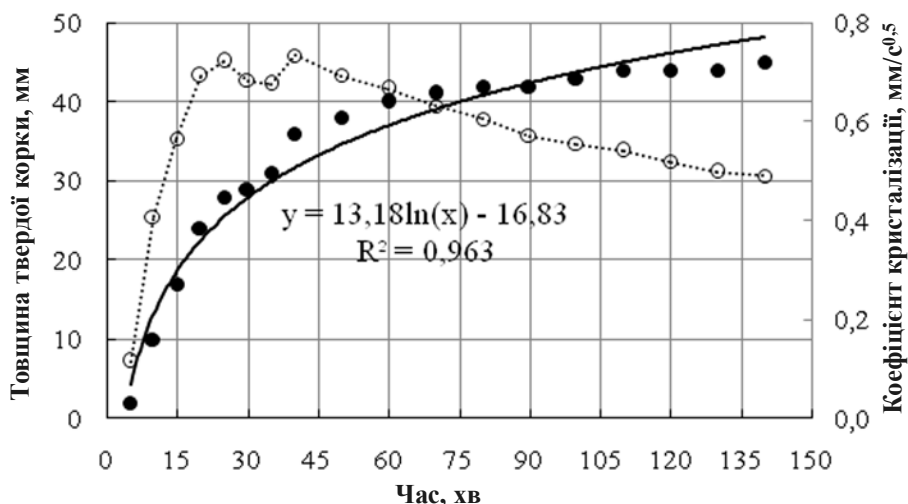


Рис. 4. Характер зміни товщини твердої корки біля вузької грані та коефіцієнта кристалізації під час проведення експерименту з обтискування слябу. —●— — товщина корки, ----○---- — коефіцієнт кристалізації.

Плавлення і кристалізація

до моделі. Це має значення для попереднього прогнозування тривалості процесу перед накладанням обтискування. На початку тверднення (близько 40 хв) має місце зростання величини коефіцієнта кристалізації до $0,75 \text{ мм/с}^{0,5}$. Утворення твердої корки сприяє зниженню тепловідведення та практично лінійному зменшенню коефіцієнта кристалізації до $0,5 \text{ мм/с}^{0,5}$ протягом 100 хв експерименту. Аналогічний характер має процес нарощування товщини утворюваної корки.

В усіх експериментах не виявлено істотного впливу ступеня обтискування на кристалізацію зразка. Відмінним є лише той факт, що за ступеня обтискування 6 мм/хв бокове випинання відбувається більш плавно з меншим ефектом переливання рідини. Це можна пояснити більш сприятливими умовами для часткового затікання модельної рідини між дендритами, а за більш інтенсивного обтискування рідина не встигає проникнути в мікропори і більш чітко проявляється ефект її витискання в напрямку рідинно-фазної області заготовки. Перші експерименти були проведені при частці твердої фази 30% і 40% (товщина закристалізованого шару близько $\delta = 13 \text{ мм}$ та $\delta = 18 \text{ мм}$). При стисненні широких граней на 2 мм ніяких значимих змін в поведінці затверділої корки вузької грані не спостерігалось. Обтискування на 4 мм викликало невелике випинання вузької грані, при стисненні на 6 мм воно значно збільшилося, а при подальшому стисненні до 8 мм було зафіксовано ще більше випинання з утворенням тріщини на середині вузької грані (рис. 5 а, г).

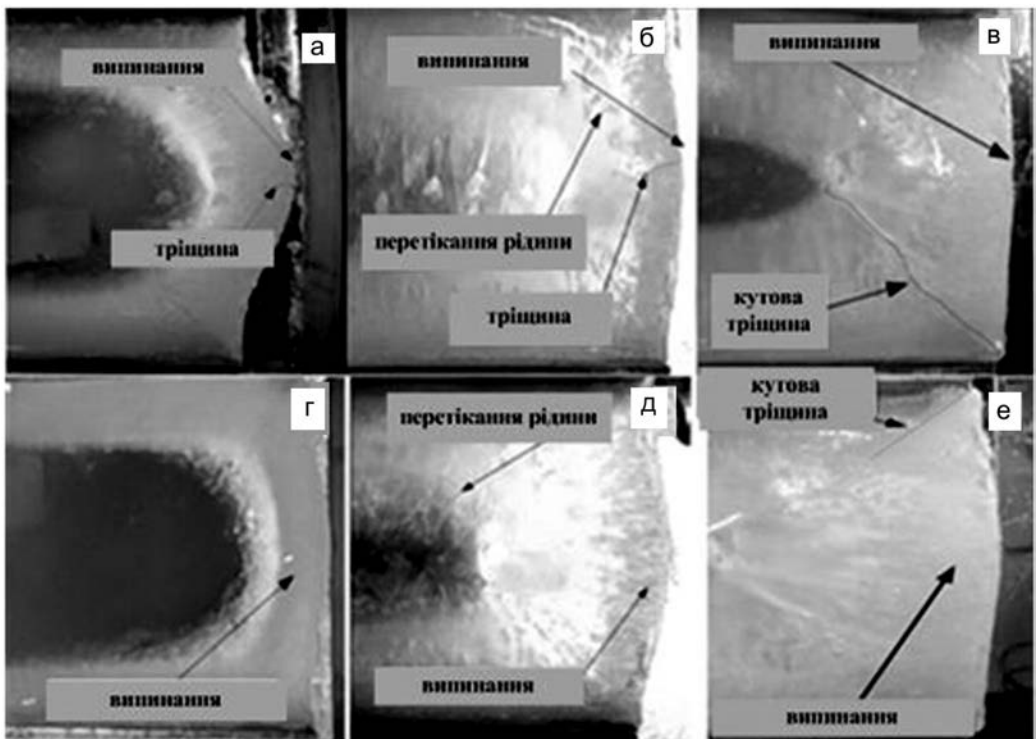


Рис. 5. Стан твердого каркасу камфену після обтискування на 8 мм (а – в) та 6 мм (г – е) за долі твердої фази, %: а, г – 30 ; б, д – 50 ; в, е – 70 .

Плавлення і кристалізація

Обтискування при частці твердої фази 50 % ($\delta = 22$ мм) показало, що конфігурація твердого каркасу не змінювалась аж до обтискування на 5 мм, після чого відбувалося випинання, яке супроводжувалось перетіканням рідкої фази і фіксувалось утворення тріщин в середній частині грані при стисненні більше 6 мм (рис. 5 б). Аналогічна картина мала місце і при експериментах з часткою твердої фази 60 % і 70 % ($\delta = 27$ мм). Однак, утворення тріщин при обтискуванні на величину 6 мм і більше відбувалось у місці стику фронтів кристалізації по кутах заготовки (рис. 5 в, е). За всіх дослідів структура деформованої корки мало відрізнялася від структури затверділої модельної речовини без обтискування. Збільшення частки твердої фази викликало зниження пластичних характеристик твердого каркасу і здатність його витримувати значні механічні напруги, які виникають під час обтискування. Крім того, встановлено, що величина випинання корки залежить не тільки від частки твердої фази, при якій починається реалізація процесу обтискування, але і від його інтенсивності (рис. 6).

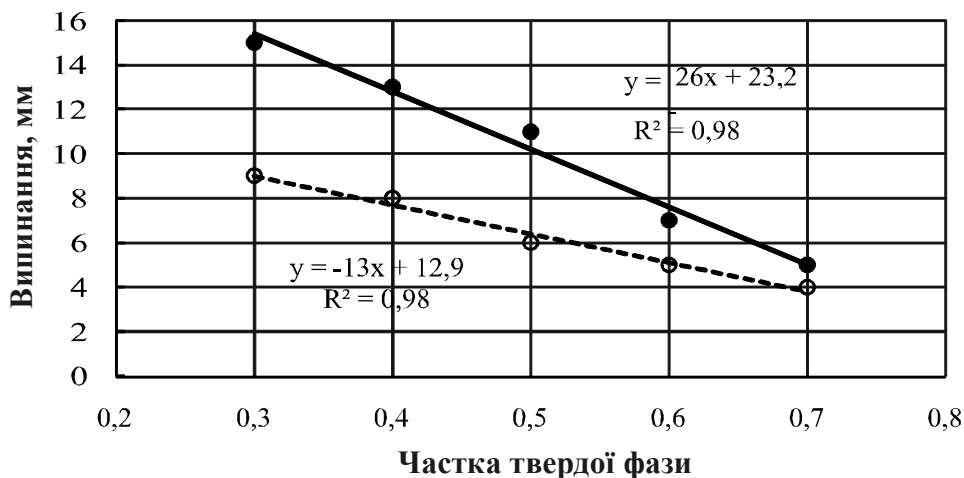


Рис. 6. Вплив твердої фази та інтенсивності обтискування на ступінь випинання твердої корки.
● – 12 мм/хв, ○ – 6 мм/хв.

На підставі рис. 6 можна стверджувати, що за кількості твердої фази 30 – 40 % ступінь випинання корки за інтенсивності обтискування 12 мм/хв понад 60 % більша порівняно з обтискуванням з інтенсивністю 6 мм/хв. За збільшення частки твердої фази ця різниця зменшується та при її значенні 70 % інтенсивність обтискування практично не впливає на величину випинання корки.

З теорії кристалізації сталі відомо, що осьова пористість та ліквіація значно зростають за збільшення поперечного перетину заготовок. При безперервному розливанні така проблема особливо актуальна для великих блюмів. Тому на другому етапі моделювання було досліджено вплив геометричної форми блюмового кристалізатора і відповідно безперервнолитої заготовки, а також параметрів обтискування на можливість зниження осьової пористості.

Плавлення і кристалізація

Основна відмінність досліджуваного кристалізатора (рис. 7) полягала в наявності приливів, об'єм яких дорівнював об'єму усадкових порожнин, які утворюються в осевій частині безперервнолитої заготовки. Вдавлювання приливів за допомогою верхніх роликів зони вторинного охолодження в тіло заготовки може значно зменшити її рихлість, що утворюється в осевій частині у зв'язку з явищами усадки, характерними для процесу кристалізації сталі.

Було виготовлено три фізичні моделі, що імітують поперечний перетин кристалізатора різної конфігурації.

Зважаючи на складність виготовлення зображених на рис. 7 конфігурацій кристалізатора з пустотилого алюмінієвого профілю і організації водяного охолодження було використано алюмінієву стрічку, а охолодження здійснювали за рахунок льоду, розміщеного по периметру моделі (рис. 8).

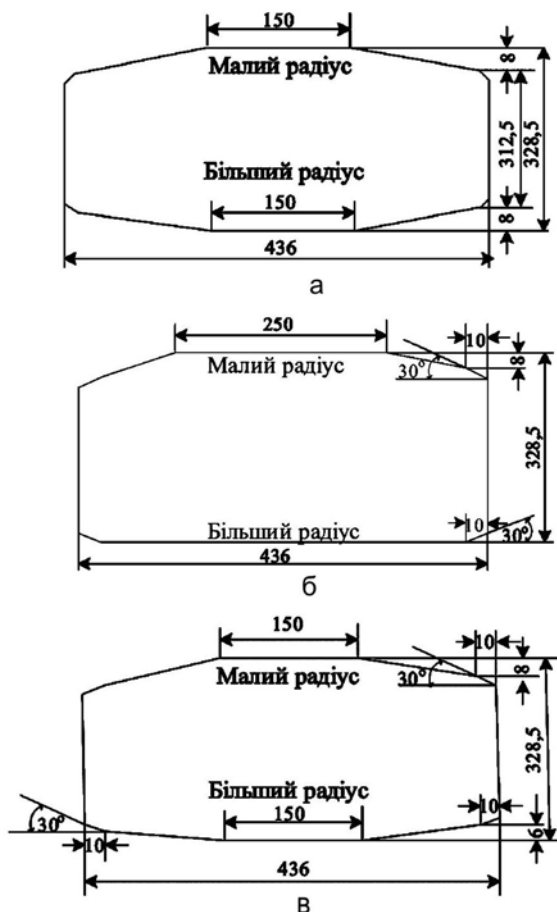


Рис. 7. Різні конфігурації поперечного перетину блюмового кристалізатора використані під час моделювання процесу обтискування.

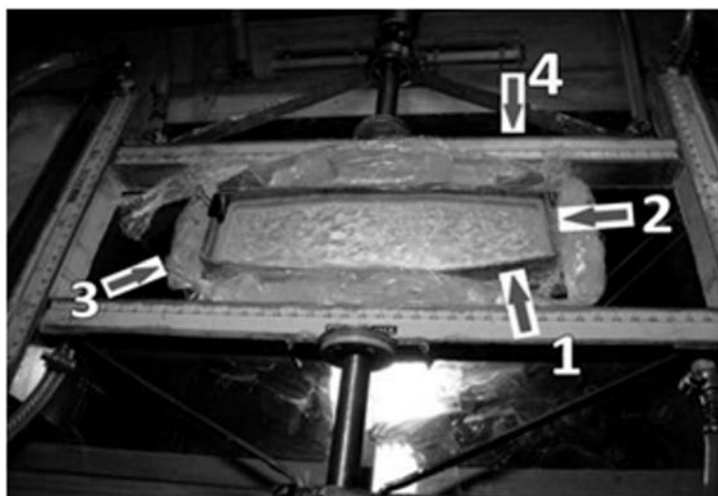


Рис. 8. Установка для фізичного моделювання обтискування безперервнолитої блюму. 1, 2 – вузька та широка грані кристалізатора, 3 – лід для охолодження стінок, 4 – пристрій для обтискування.

За аналогією з попередніми експериментами досліджено характер зміни швидкості та коефіцієнта кристалізації протягом часу та встановлено, що якісна картина кристалізації камфену при моделюванні твердіння слябу і блюму практично не відрізняється, а швидкість утворення твердої фази за умови використання льоду значно нижча у порівнянні з охолодженням моделі водою з витратою 1,125 л/хв. Причому швидкість нарощування корки біля вузької грані перевищує аналогічне значення для широкої сторони моделі (рис. 9).

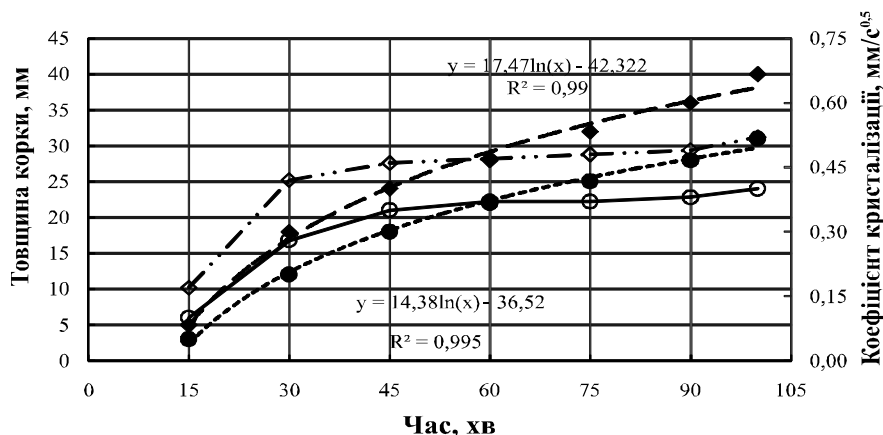


Рис. 9. Характер зміни товщини корки біля вузької та широкої грані та коефіцієнта кристалізації під час проведення експериментів з обтискуванням блюму. \blacklozenge – товщина корки (вузька грань), \bullet – товщина корки (широка грань), \diamond – коефіцієнт кристалізації (вузька грань), \circ – коефіцієнт кристалізації (широка грань).

Товщину затверділої модельної речовини вимірювали за допомогою відеозйомки (рис. 10).

Після досягнення 70 % твердої фази здійснювали механічне обтискування в моделях різної конфігурації кристалізатора (рис. 7) із інтенсивністю 6 мм/хв та 12 мм/хв, в процесі якого стежили за деформацією твердої фази і фіксували появу дефектів.

При використанні моделі з двома однаковими приливами (рис. 7 а) за обтискування на 4 мм (по 2 мм з обох боків) утворилися тріщини на широких гранях в місцях плавного переходу приливів у широку грань (рис. 11). Подальше обтискування на 2 мм викликало невелике випинання вузької грані, яке зростало при збільшенні ступеня обтискування ще на 2 мм, але нових тріщин не утворювалося. Після проведення експерименту конфігурація поперечного перетину заготовки була близькою до прямокутника.

На другому етапі моделювання використовували конфігурацію моделі з одним приливом (рис. 7 б). При обтисненні на 4 мм не було виявлено тріщин, але мало місце значне витискання рідини до верхніх горизонтів моделі. Після обтискування на 4,5 мм з'явилося невелике випинання, а при величині деформації 6 мм в місцях плавного переходу приливів до широкої грані з'явилися невеликі тріщини.

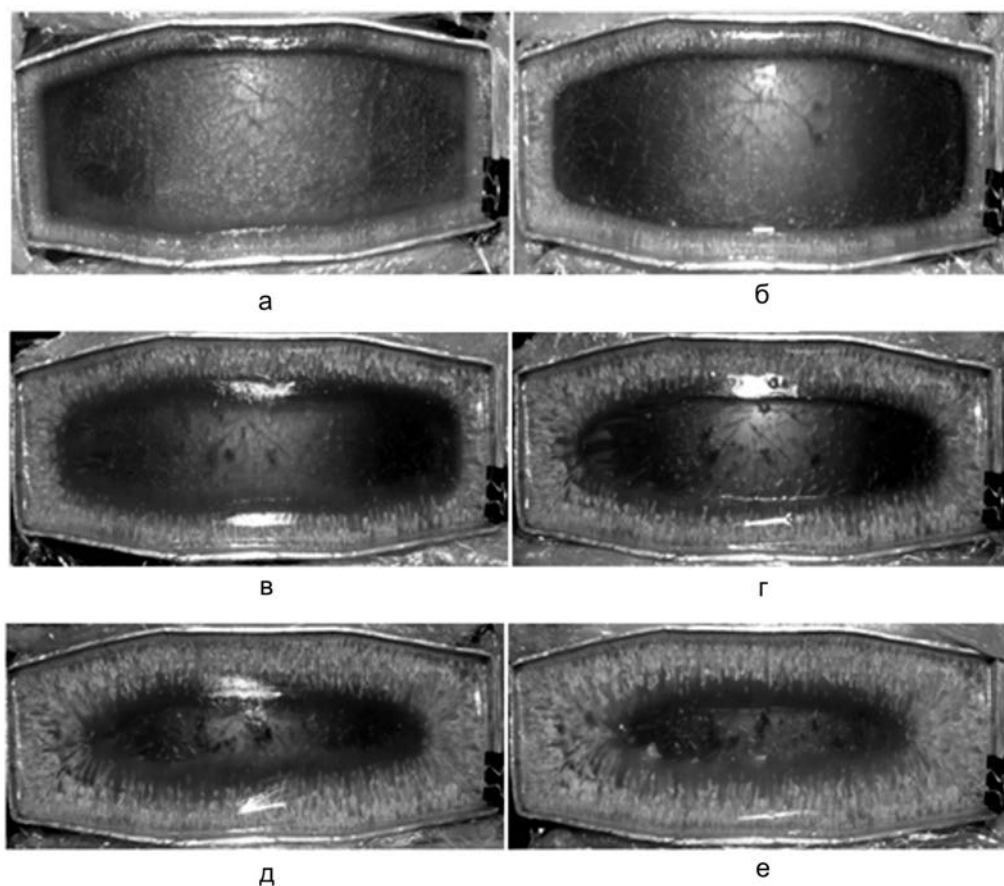


Рис.10. Приклад динаміки тверднення модельної речовини. а – 5 хв, б – 25 хв, в – 40 хв, г – 55 хв, д – 70 хв, е – 85 хв.

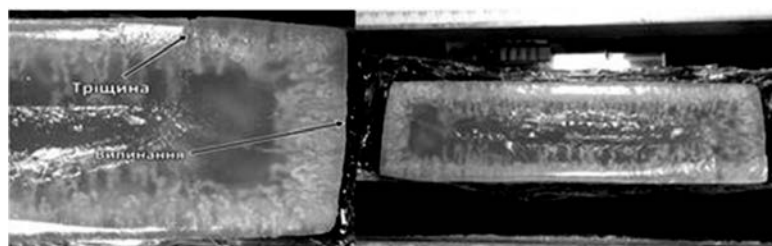


Рис. 11. Зовнішній вигляд затверділого камфену після обтискування.

Найкращі результати було отримано при використанні моделі з двома приливами різного об'єму (рис. 7 в). Така конфігурація була обрана з точки зору більш рівномірного розподілення навантаження на твердий каркас, зважаючи на обтискування верхніми роликками, а також з метою зосередження осьової пористості по центру заготовки. За даними роботи [7] при розливанні на криволінійних МБЛЗ осьова рихлота і осьова хімічна неоднорідність розташовані не в середині сляба, а зміщені на 1,2 – 2,5 % (відн.) по товщині, тобто темплети мають асиметричну будову. Причому

без м'якого обтискування має місце нижня асиметрія, а обтискування заготовки зміщує цю зону вгору. Тому виконання кристалізатора з приливами різної висоти має сприяти вирішенню цієї проблеми, тобто зміщенню усадкових дефектів ближче до геометричної осі заготовки.

Обтискування заготовки, отриманої з використанням моделі, зображеної на рис. 7 в, на величину 8 мм не призвело до утворення тріщин та значного випинання твердої корки, а конфігурація заготовки після обтискування була близька до прямокутної форми.

Слід зауважити, що при обтискуванні за кількості твердої фази 70 % процеси випинання мають обмежений характер, зважаючи на міцність утвореного каркасу заготовки і інтенсивність обтискування у цьому випадку практично не впливає на випинання корки, що було встановлено раніше під час обтискування слябів (рис. 6).

В результаті проведених експериментів встановлено, що оптимальна величина обтискування, при якій не відбувається виникнення тріщин при обтискуванні слябів, становить не більше 5 – 6 мм (до 2 % товщини заготовки). При збільшенні величини обтискування до 7 – 8 мм спостерігається випинання заготовки і утворення тріщин по центру вузьких граней, а також в кутах в місці стику фронтів кристалізації.

Для зменшення осьової пористості і зміщення її до геометричної осі заготовки запропоновано конфігурацію кристалізатора з приливами різної величини за об'ємом, близьким до об'єму усадкових порожнин, що утворюються під час кристалізації сталі. Використання такої конфігурації кристалізатору дозволило здійснити обтискування заготовки на величину 8 мм без утворення тріщин та значної деформації заготовки.

Література

1. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Паршин В.М. Непрерывная разливка стали. – Липецк: НЛМК, 2011. – 221 с.
3. Еронько С.П. Разливка стали: оборудование, технология. – Київ: Техніка, 2003. – 216 с.
4. Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Жибоедов Е.Ю. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ // Процессы литья. – 2009. – №1. – С. 33 – 42.
5. Куберский С.В., Левит М.Б., Семирягин С.В. Разработка физической модели методики исследования процесса динамического мягкого обжатия непрерывнолитого сляба // Сборник научных трудов. – Вып.36. Алчевск: ДонГТУ. – С. 204 – 212.
6. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Левит М.Б. Физическое моделирование процесса динамического мягкого обжатия непрерывнолитого сляба // Металлургическая и горнорудная промышленность. – №7. – 2012. – С. 133 – 136.
7. Мошкун В.В., Столяров А.М. Влияние мягкого обжатия на макроструктуру слябовой непрерывнолитой заготовки из трубной стали // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – №4 (40). – С. 45 – 47.

References

1. Smirnov A.N. Npreryivnaya razlivka stali / A.N. Smirnov, S.V. Kuberskiy, E.V. Shtepan. – Donetsk: DonNTU, 2011. – 482 s.
2. Parshin V.M. Npreryivnaya razlivka stali / V.M. Parshin. – Lipetsk: NLMK, 2011. – 221 s.

3. Eronko S.P. Razlivka stali: oborudovanie, tehnologiya / S.P. Eronko, S.V. Byikovskih. – K.: Tehnika, 2003. – 216 s.
4. Smirnov A.N. Fizicheskoe modelirovanie usloviy formirovaniya nepreryivnolitoi sortovoy zagotovki v kristallizatore vyisokoskorostnoy MNLZ / A.N. Smirnov, V.E. Uhin, E.Yu. Zhiboedov // Protsessyi litya. – 2009. – №1. – S. 33 – 42.
5. Kuberskiy S.V. Razrabotka fizicheskoy modeli metodiki i issledovaniya protsessa dinamicheskogo myagkogo obzhatiya nepreryivnolito slyaba / S.V. Kuberskiy, M.B. Levit, S.V. Semiryagin // Sbornik nauchnyih trudov. Vyip.36. Alchevsk: DonGTU. – S. 204 – 212.
6. Smirnov A.N. Fizicheskoe modelirovanie protsessa dinamicheskogo myagkogo obzhatiya nepreryivnolito slyaba / A.N. Smirnov, S.V. Kuberskiy, M.B. Levit, S.V. Semiryagin // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. – №7. – 2012. – S. 133 – 136.
7. Moshkunov V.V. Vliyanie myagkogo obzhatiya na makrostrukturu slyabovoy nepreryivnolitoi zagotovki iz trubnoy stali / V.V. Moshkunov, A.M. Stolyarov // Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. – 2012. – №4 (40). – S. 45 – 47.

Одержано 05.04.17

А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, М. Ю. Проценко

Физическое моделирование процесса обжатия непрерывнолитых слябов и блюмов во время их кристаллизации

Резюме

Проведено фізическе моделювання процесу обжаття неперервнолитих заготовок при їх кристалізації. Установлені залежності ступені випучивання корки, при зміні частини твердої фази та інтенсивності обжаття, товщини корки від часу затвердіння, а також характер зміни во часі коефіцієнта кристалізації модельного речовини. Показано вплив частини твердої фази, ступені та інтенсивності обжаття, а також конструкції кристалізатора на формування тріщин та випучивання заготовок при їх обжатті.

A. N. Smirnov, S. V. Kuberskiy, M. Yu. Protsenko

Physical modeling of the process of compression of continuously cast slabs and blooms during their crystallization

Summary

Studies were carried out on the physical modeling of the process of compression of continuously cast billets during their crystallization. Dependences of the degree of buckling of the crust, with a change in the proportion of the solid phase and the crushing intensity, the thickness of the crust on the time of solidification, and the character of the time variation of the crystallization coefficient of the model substance are established. The influence of the fraction of the solid phase, the degree and intensity of the reduction, as well as the design of the crystallizer on the formation of cracks and the buckling of the blanks during their compression are shown.