

SECTION 8. METALLURGY

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.8.1

8.1 Дослідження факторів, що впливають на якість чавунних прокатних валків

8.1.1 Характеристика, умови експлуатації та вимоги до матеріалу чавунних прокатних валків

Підвищення продуктивності прокатних станів та якість листового прокату висувають високі вимоги до експлуатаційних властивостей формуючого інструменту та збільшення терміну його служби. Конструкційним матеріалом, що широко використовується для виготовлення прокатних валків, є чавун. Чавунні литі валки менш міцні, ніж сталеві, але більш зносостійкі, тому їх застосовують у передчистових та чистових клітках листопрокатних, сортопрокатних та трубопрокатних станів. Чавунні валки з кулястим графітом застосовують у чорнових клітках, оскільки їхня твердість не висока. Чавунні валки за складом і, отже, структури класифікують так [361]:

- валки сортопрокатні та листопрокатні (з вибіленим робочим шаром).

Вони мають робочий вибілений та перехідний шар, що складається з половинчастого чавуну. Серцевину виготовляють із сірого чавуну. Твердість таких валків становить 68...70 HSD);

- леговані хромом та нікелем валки (СПХН) з карбідо-графіто-перлітною структурою та пластинчастим графітом мають досить глибокий робочий шар, що забезпечує невелике падіння твердості на глибину рівчака з урахуванням необхідності переточування у міру зносу;

- вибілені хромонікелеві двошарові валки (ЛПХНд) з високолегованим вибіленим шаром, міцною серцевиною, шийками та тріфами з нелегованого чавуну. Вони мають вибілений шар товщиною 12...32 мм при виготовленні їх стаціонарним методом і до 60мм при відцентровому литті, коротку (5...15 мм) перехідну зону та міцну серцевину;

- вибілені хромонікелеві валки з чавуну з кулястим графітом (ЛШН та

СШХН). Глибина вибіленого шару може досягати 32 мм;

- високохромисті валки (12...18% Cr). Мають високу зносостійкість.

Вимоги до матеріалу валків нерозривно пов'язані з його поведінкою при термоциклічній дії та зносі. При розгляді цих процесів потрібно встановити роль впливу основних експлуатаційних факторів, а також виявити початкові етапи руйнування структурних складових та всієї їх поверхні. Стійкість валків визначається величиною зносу, під яким розуміють інтенсивність контактної ушкоджуваності поверхневих шарів. Знос залежить від фізичних, хімічних і механічних властивостей поверхонь тертя, поєднання матеріалів поверхонь тертя, взаємодії з розділяючим їх середовищем, чистоти механічної обробки, виду тертя, питомого тиску між тілами, швидкості взаємного переміщення поверхонь тертя відносно одна одної, тривалості взаємодії між тілами, а також системи та ступеня їх охолодження при експлуатації.

Розрізняють [361] такі види зносу: знос схоплювання; окисний; тепловий; абразивний; оспоподібний, характерний для тертя кочення. Знос схоплюванням виникає при терті ковзання з малими швидкостями відносного переміщення поверхонь, що труться, і невеликому питомому тиску при відсутності мастила. Окислювальне зношування характеризується дифузією кисню в метал деформованих при терті поверхневих шарів і утворенням твердого розчину кисню та хімічних сполук у металі. У важко навантажених деталях машин і при великих швидкостях тертя виникає тепловий знос, що характеризується процесом рекристалізації, схоплювання і оплавлення металів, що труться. Темп зношування є найбільшим. Абразивний знос - це процес дряпання поверхонь, що труться твердими абразивними частинками (цементит в чавунних валках, карбіди і окисли в підкаті) металу поверхневих шарів деталей, що труться, супроводжується протіканням мікропластичної деформації і зміцненням. При цьому виді зносу велике значення має твердість, границя міцності та в'язкість металу. Прокатні валки схильні до всіх зазначених вище видів зносу. При прокатуванні абразивному зношуванню валка сприяє окалина, яка утворюється на поверхні бочки валка та підкату. Зношування поверхні валків відбувається

також за рахунок утворення тріщин розпалу, що пов'язано з термоциклічним впливом при експлуатації. Охолоджувачем поверхні валка використовують підігріту воду, яка сприяє корозії поверхні, оскільки вона постійно знаходиться в напруженому стані. Корозійна стійкість валка залежить від відношення концентрацій Cr/C .

Руйнування валків носить, як правило, крихкий характер. У процесі експлуатації через низьку якість металу, тривалий період прокатки, неоптимального знімання металу при перешліфуванні в поверхневому шарі можуть утворюватися втомні тріщини. Розвиток їх йде повільно, тому на станах повинні використовуватися заходи щодо своєчасного ремонту валків, зокрема проводити операції відпочинку та перешліфування. У зв'язку зі зносом прокатні валки піддаються переточуванням, число яких визначається діаметром валка, глибиною робочого шару та допусками. На чавунних валках через інтенсивний спад твердості повинно забезпечуватися мінімальне знімання металу при переточках. Після певної кількості переточувань валки стають непридатними для подальшої експлуатації внаслідок суттєвої зміни розмірів. Значна кількість валків при експлуатації зазнають аварійних руйнувань внаслідок розвитку в окремих перерізах глибоких втомних тріщин. Першопричиною такого руйнування є тріщини розпалу на робочих поверхнях, зумовлені термічною втомою. Тріщини проникають до 5...6 мм, що перевищує глибину знімання металу під час переточування. При згинальних навантаженнях з'являються глибші поперечні тріщини втоми різної конфігурації. Концентратори руйнування зазвичай знаходяться на поверхні валка. Це кільцева тріщина, або залишки розпальних - при багатоосередковому руйнуванні, вдавлена окалина, сліди механічної обробки (підрізи). Причиною багатоосередкового руйнування може бути неоднорідна мікроструктура, що пов'язана з різною міцністю структурних складових, підвищеною забрудненістю поверхневих шарів неметалевими включеннями. Руйнування при експлуатації валків відбувається по бочці чи ділянці переходу від бочки до шийки. У прокатних валках найбільші стискаючі навантаження концентруються в поверхневому шарі валка, а

найбільші розтягувальні напруження виникають на половині радіуса бочки валка. Руйнування втомного характеру проходить як по тілу зерен, так і за їх межами. При прокатці поряд із термічною, корозійною втомою в матеріалі валка може проявлятися деформаційне старіння [361].

Крім зношування можливі поломки валків. Найбільш ймовірні втомні злами в переході від бочки до шийки, які відбуваються внаслідок помилок у конструкції, корозії, грубої шорсткості або надто великих зусиль прокатки. Як правило, це багатоосередкове руйнування.

Враховуючи роль впливу основних експлуатаційних факторів, що впливають на валки для гарячої прокатки листа, до них пред'являються такі вимоги [362]: висока зносостійкість для запобігання зміні профілю прокату в зоні деформації; стійкість до утворення тріщин розпалу та налипання металу смуги до робочої поверхні валка; висока стійкість до фарбування, особливо при підвищених та нерівномірних зусиллях прокатки; наявність невеликих залишкових напружень та висока механічна міцність матеріалів; висока якість зварювання робочого шару та серцевини валка; необхідні властивості шийок і серцевини при згинальних та скручувальних навантаженнях, а також висока зносостійкість шийок для роботи в жорстких умовах тертя між кільцем підшипника та шийкою. Забезпечення перелічених вище вимог може бути досягнуто за рахунок застосування методу відцентрового лиття, який значно розширює можливості використання зносостійких, але нетехнологічних матеріалів, таких як високохромисті чавуни.

Технологія відцентрового лиття особливо широко використовується при виробництві дво- та багат шарових валків з високозносостійким та твердим робочим шаром та м'якою і міцною серцевиною. Останнім часом з'явилася значна кількість публікацій та винаходів, що стосуються різних способів виробництва та застосування таких валків для широкосмугових та листових станів. При використанні таких валків значно збільшується випуск і підвищується якість обробки прокату. До факторів, що впливають на їх якість, належать: хімічний склад сплаву, температурні параметри лиття, умови

формування структури робочого шару та ін. Відцентроволиті валки, на відміну від стаціонаролитих, мають ряд переваг: збільшену товщину робочого шару; постійну твердість металу практично в усьому перерізі робочого шару; дрібнозернисту структуру. Процес виготовлення відцентроволитого валка складається з наступних етапів: виготовлення форм шийок (привідної та непривідної) та їх сушіння; підготовка кокілю; плавлення металів робочого шару та серцевини та їх модифікування; збирання форми валка; заливання металу робочого шару, а потім серцевини; розбирання форми та вилучення виливки; термообробка виливка; механічне оброблення; контроль якості.

Відцентрове лиття прокатних валків здійснюється різними способами: комбінований спосіб виливки, коли робочий шар відливається в кокіль, що горизонтально обертається, а заливка серцевини виробляється у стаціонарно встановлену форму; відцентровий відлив робочого шару і серцевини валка у форму, що обертається з похилою віссю; вертикальний метод відцентрового лиття [363]. При відцентровому литті існують великі можливості поєднання робочого шару і серцевини валка, що мають різні фізико-механічні властивості. Вибір матеріалу серцевини, що має високу міцність і пластичність, забезпечує резерв працездатності прокатного валка. Як матеріал серцевини може бути використаний сірий чавун, чавун з вермикулярним, а також пластинчастим графітом. У зв'язку зі збільшеними вимогами до властивостей міцності валків та інтенсифікації режимів прокатки з'явилася необхідність у виробництві валків, що не вимагають їх попереднього розігріву в стані. Ця проблема була вирішена шляхом виготовлення серцевини та шийок валків із високоміцного чавуну з кулястим графітом. Впровадження у виробництво позапічної обробки матеріалу серцевини відцентроволитих валків лігатурами та модифікаторами імпортного виробництва дозволило стабільно вийти на рівень механічних властивостей, що відповідають вимогам прокатників. За повідомленнями фірми "Hitachi Kinzoku Ltd" експлуатаційна стійкість відцентроволитих двошарових валків на 10-70% вище, ніж відлитих стаціонарним способом [364].

Відцентроволиті валки відрізняються і структурою. Карбіди є одним із

основних елементів структури білих легованих чавунів. Будова карбідної фази у виливках з білих зносостійких чавунів визначається хімічним складом та умовами кристалізації. Умови кристалізації дуже впливають на первинну структуру хромистих чавунів. Варіюючи швидкістю охолодження при кристалізації, напрямом тепловідведення і, роблячи інші впливи на розплав, змінюють такі важливі характеристики структури як розмір і взаємне розташування карбідів.

Щоб отримати необхідне співвідношення структурних складових та задані властивості карбідної фази, додатково вводять легуючі добавки. Оскільки робочі валки перших чистових клітей прокатних станів експлуатуються при жорстких температурних умовах, то для виготовлення робочого шару, наприклад, використовується високохромистий чавун з додатковим легуванням карбідоутворюючими елементами для отримання первинних і вторинних карбідів M_7C_3 і $M_{23}C_6$, включення карбідної фази яких дрібніші і розподілені в матриці рівномірно, що сприятливо впливає на зносостійкість і властивості міцності робочого шару валка. На даний час провідні вальцеливарні фірми виготовляють високохромисті валки з вмістом хрому 12-20% та вуглецю 2,4-3,4%. Найчастіше концентрація кремнію в межах 0,4-0,6%, а марганцю 0,8-1,2%. У ряді випадків у такий чавун вводять нікель у кількості 0,8-3,0%. Високохромисті чавуни мають низьку теплопровідність, пластичність, високу усадку і тому при виробництві характеризуються підвищеною схильністю до утворення гарячих та холодних тріщин. Для зниження їх схильності до тріщиноутворення здійснюється комплексне легування молібденом марганцем та ванадієм. Велика кількість інформаційного матеріалу, присвяченого питанням підвищення стійкості валків шляхом оптимізації легування, пов'язана з тим, що цей напрямок дозволяє суттєво змінювати структуру сплаву (співвідношення структурних складових, ступінь їхньої дисперсності) та рівень фізико-механічних властивостей, що задовольняють вимогам прокатників [365, 366]. Службові властивості білих чавунів залежать не лише від кількості та типу карбідів, а й від структури металевої основи, властивості якої, залежно від

призначення, регулюються вибором режимів термообробки валків [361].

8.1.2 Область застосування та способи виробництва відцентроволитих валків

На широкосмугових станах донедавна в перших клітинах чистових груп листових і широкосмугових станів гарячої прокатки застосовували тільки двошарові робочі хромонікель-молібденові валки з середньою твердістю робочого шару 68HSD. Внаслідок високих вимог, які пред'являються до якості поверхні прокату, виникла потреба щодо пошуку застосування нових матеріалів з більш зносостійких сплавів. Підвищення технічного рівня прокатних станів, зростання їх продуктивності при одночасному підвищенні вимог до якості прокату (точність геометричних розмірів, оздоблення продукції) висуває все більш суворі вимоги та якості прокатних валків.

Метод відцентрового лиття валків розширив можливості використання нетехнологічних зносостійких матеріалів – високохромистих чавунів. Використання валків із високохромистого чавуну фірми Bofors Akers на прокатних станах Німеччини та Скандинавії показали, що термін їх служби підвищується приблизно на 100%. Простої через перевалки робочих валків знизилися з 10 до 3% річного часу роботи стану, підвищилася якість прокату, зменшилася поперечна різнотовщинність смуги на 13-27%. При відцентровому литті валків глибина робочого шару зростає до 60-70 мм замість 12-24 мм при стаціонарному, що збільшує напрацювання на валок у 1,5-2 рази [367].

Робочий шар відцентроволитих валків характеризується більш дисперсною структурою, ніж у валків, відлитих стаціонарним способом. Підвищена дисперсність, особливо карбідної фази, сприятливо впливає на зносостійкість та властивості міцності робочого шару валка. Збільшується щільність металу та зростає товщина та однорідність робочого шару за висотою вилівка, знижується їх схильність до викрошування. Відповідно даним фірми "Hitachi Kinzoku Ltd" експлуатаційна стійкість відцентроволитих двошарових валків на 10-70% вище, ніж тих, що відлиті стаціонарним способом [364].

При використанні валків із високохромистих чавунів необхідно забезпечити високу зносостійкість для запобігання зміні профілю прокату в зоні деформації; стійкість до утворення тріщин розпалу та налипання металу смуги до робочої поверхні; високу стійкість до викрошування, особливо при підвищених та нерівномірних зусиллях прокатки; наявність невеликих залишкових напружень та достатню механічну міцність матеріалу робочого шару, а також необхідну якість зварювання робочої поверхні з серцевиною валка. При відцентровому литті існують великі відмінності у поєднанні матеріалів робочого шару та серцевини валка, які мають відмінні фізико-механічні властивості. Вибір матеріалу серцевини, що має високу міцність і пластичність, забезпечує надійність працездатності інструменту. Необхідні властивості шийок та серцевини при згинальних та скручувальних навантаженнях, як правило, досягають додатковим легуванням та модифікуванням металу. У ряді випадків для металу серцевини крім сірого чавуну використовують високоміцний [361].

В останні роки технологія відцентрового лиття особливо широко використовується при виробництві дво- та багат шарових валків [368]. Проведений аналіз показав, що відцентрове виливок прокатних валків здійснюється різними способами. Комбінований спосіб передбачає виливок робочого шару горизонтально в кокіль, що обертається, а заливку серцевини виробляють в стаціонарно встановлену форму. Метод розроблено та реалізовано у промислових умовах японською фірмою "Kubota". У такий же спосіб виробляє валки шведська фірма "Bofors Akers", японська фірма "Kantok Rolls". На даний час на ливарному заводі фірми "Kubota" виробляються відцентроволиті валки діаметром від 500 до 950 мм, довжиною бочки від 1200 до 2200 мм та вагою від 3 до 17т. Відцентрове відливання робочого шару і серцевини валка в форму, що обертається, з похилою віссю виробляється фірмою "Hitachi Kinzoku Ltd". На вальцеливарному заводі фірми відливають валки ширококутових та сортових станів з діаметром 410 – 835мм, довгою бочки 900 – 2450мм та вагою до 12т. На заводі щорічно виробляється до 5,5 тис.т відцентроволитих валків для ширококутових станів.

Вертикальний метод відцентрового лиття був вперше застосований у Європі фірмами "Gontermann Peipers" та "Marichal Ketin" [369-372]. В даний час цей спосіб виливки застосовується у Великій Британії фірмою "Midland Rolls Maners", "USINOR" (Франція), "Sulzer" (Австрія). Фірма "Midland Rolls Maners" освоїла технологію виробництва відцентроволитих валків вагою від 3 до 15т.

Відцентрове виливок двошарових валків набуло широкого застосування для виробництва робочих валків чистової групи клітей широкосмугових станів. Застосування методу відцентрового лиття дозволило значно покращити показники якості та експлуатаційні характеристики таких валків. При відливанні зміна твердості (її спад) по глибині робочого шару практично відсутня. У валків, відлитих стаціонарним способом, спад твердості перерізу починається вже з глибини 5-10 мм. Тому після кожного наступного перешліфування в таких валках знижується їхня зносостійкість, скорочується загальний термін служби та якість металопрокату.

8.1.3 Прокатні валки із високохромистого чавуну

Відома значна кількість публікацій та винаходів щодо успішного застосування для таких валків двошарових композицій з робочим шаром із високохромистого чавуну [361, 373]. Ряд зарубіжних вальцеливарних фірм з початком освоєння методу відцентрового лиття застосовують валки цього типу [364-372]. Аналіз інформаційних матеріалів показав, що на даний час провідні вальцеливарні фірми виготовляють високохромисті валки з вмістом хрому 12 - 20% та вуглецю 2,4 - 3,4%. Найчастіше концентрація кремнію в межах 0,4 - 0,6%, а марганцю 0,8 - 1,2%. У ряді випадків у такий чавун вводять нікель у кількості 0,8-3,0%.

Експлуатаційна стійкість валків з високохромистого чавуну значно вища, ніж з - хромонікелевого (4,0-4,5%Ni і 1,5%Cr) або адаміту, що пов'язано з його меншою схильністю до формування сітки розпалу, окислення, налипання окалини при прокатці, більш високої твердості в результаті формування спецкарбідів хрому типу Me_7C_3 та $Me_{23}C_6$. При використанні відцентроволитих валків із високохромистого чавуну замість звичайних хромонікель-молібденових

випуск прокату (т/валок) можна суттєво збільшити і витрати валків знизити у 1,5-2 рази [361].

Спосіб відцентрового лиття двошарових валків з робочим шаром з високохромистого чавуну забезпечує економію легуючих елементів і дозволяє легко механічно обробляти менш тверді шийки та трефи із сірого або модифікованого чавуну. Такі переваги валків з робочим шаром із високохромистого чавуну (12-18%Cr) забезпечують стійкість у чистовій групі клітей листових та широкосмугових станів на рівні 3500 - 6500 т/мм знімання робочого шару [367].

Залежно від умов експлуатації та призначення високохромисті прокатні валки виготовляють із твердістю 58-80HSD. Для забезпечення надійної роботи валків такого типу потрібно достатнє охолодження їх у кліті, не можна допускати перегрів поверхні (більше 600°C) та тривалі інтервали під час прокатки, при яких має місце сильне охолодження. Слід також враховувати можливість налипання окалини (у зв'язку з підвищеною часткою залишкового аустеніту) на валки з твердістю до 70HSD і в цьому випадку не допускати особливо великих обтискань.

8.1.4 Особливості структури і властивостей високохромистих валків

При виготовленні високохромистих валків виходять із вимог експлуатації, а рівень властивостей та зносостійкості забезпечуються оптимальним співвідношенням основних та легуючих елементів. Розглянемо вплив основних хімічних елементів у таких сплавах.

Хром є основним легуючим елементом групи зносостійких білих чавунів. Його вміст у таких сплавах може досягати 35%. В результаті легування сплавів хромом підвищується твердість, коерцитивна сила та залишкова індукція, опір корозії, жаростійкість та механічні властивості. Крім того, при збільшенні вмісту хрому в сплаві підвищується опір різним видам зношування. Легування цим компонентом дозволяє підвищити міцність чавуну у умовах експлуатації за нормальних температурах, а й після багаторазового циклічного нагріву [374].

Високохромисті чавуни мають високу окалиностійкість. Кількість хрому, що забезпечує добрий опір окисленню, визначається температурними умовами роботи. Наприклад, при температурі 700°C достатньо в сплаві 10% хрому, а при 1000°C необхідно до 20%. Чавун з 30% хрому та 1,1-3,1% вуглецю не окислюється до 1100-1150°C.

Кремній також дозволяє підвищити окалиностійкість хромистих чавунів. У чавунах, що містять більше 12% хрому, збільшення концентрації кремнію на 1% рівнозначне підвищенню вмісту хрому на 2%. Однак вміст кремнію не повинен перевищувати 2-3%. Це пояснюється збільшенням чутливості до перепаду температур під час експлуатації та, у зв'язку з цим, з можливістю утворення тріщин. Вуглець, значно впливаючи на механічні властивості, мало впливає на жаростійкість і утворення окалини в хромистих чавунах.

Механічні властивості високохромистого чавуну значною мірою визначаються вмістом хрому та вуглецю. Вони залежать, в першу чергу, від характеру карбідної фази, що формується [375]. Велика кількість твердих і тендітних включень карбідних фаз знижує пластичні властивості чавуну. Хром сильно впливає на склад карбідної фази. Він відноситься до елементів, що сприяють сильному карбідоутворенню при евтектичному перетворенні. Хром може частково замінювати атоми заліза в орторомбічному карбіді $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ або утворювати спеціальні карбіди, в яких частина його атомів заміщена залізом або іншими елементами: тригональний Me_7C_3 і кубічний Me_{23}C_6 .

За даними [376] при концентрації до 9,5% хром не помітно впливає на первинну структуру чавуну. Карбідна фаза за такого вмісту хрому представлена легованим цементитом. Білі чавуни системи Fe-C-Cr з карбідами Me_3C кристалізуються із утворенням евтектики ледебуритного типу. Будова ледебуритних колоній однаково як із 0, і при 9% хрому. Чавуни з карбідами типу Me_3C характеризуються великою схильністю до крихкого руйнування та невисокими механічними властивостями.

Хромістокарбідна евтектика утворюється при концентрації хрому більше 10%. Мікроскопічна картина затвердіння та морфологія структурних складових

при цьому змінюється, що пов'язано з появою нового типу карбідної фази. При збільшенні вмісту хрому в чавуні від 9,5 до 12% ледебурит поступово замінюється аустеніто-хромістокарбідною евтектикою. Перехід до карбіду Me_7C_3 пов'язаний з кристалізацією такої евтектики. При цьому, більшою мірою в чавунах, кристалізуються карбіди типу Me_7C_3 ніж Me_3C [361]. Евтектичні колонії $Me_7C_3 + \gamma$ є довгими голками тригонального карбіду, пов'язаними короткими перемичками. Карбіди Me_7C_3 мають виражену анізотропію властивостей. Цим зумовлено відмінність міцності та твердості за різними напрямками кристалічних ґраток карбіду. Наприклад, у зносостійкому чавуні з 15% хрому і 3% молібдену твердість карбідів становить 950HV вздовж осі у - 1500HV вздовж осі с [377]. Створення структури природного композиту в зносостійких чавунах з карбідами Me_7C_3 шляхом спрямованої кристалізації дозволило досягти для цих матеріалів міцності приблизно в 2 рази вище, ніж при звичайній такого ж складу і це може бути забезпечено відцентровим литтям робочого шару листопрокатних валків. За результатами досліджень можна припустити, що максимальними властивостями міцності і службовими повинні мати чавуни з концентрацією $Cr = 17-21\%$.

Це обумовлюється високою міцністю та пластичністю металевої основи, у складі якої є включення метастабільного аустеніту. Такий чавун у складі евтектики містить, крім аустеніту, тригональний карбід Me_7C_3 – найстійкіший і найтвердіший серед існуючих у залізовуглецевих сплавах. Разом з тим, такий чавун матиме підвищену схильність до викрошування в процесі експлуатації. У литому стані такі сплави можуть представляти трифазну систему [376]: α -твердий розчин, що складається з δ -фериту та продуктів перетворення аустеніту (мартенсит, α -ферит) + γ -твердий розчин (залишковий метастабільний аустеніт) + карбідна фаза (евтектичні, первинні та вторинні). Наявність у сплаві продуктів розпаду аустеніту характерна для структури товстостінних виливків, що обумовлено уповільненою швидкістю охолодження. Присутність δ -фериту, наявність якого зменшує зносостійкість сплаву, у структурі металевої основи можлива у виливках з різною товщиною стінки та пояснюється неоднорідністю

рідкого розплаву за реальних умов промислової плавки.

Питання щодо найбільш сприятливого, з погляду зносостійкості, розташування карбідів Me_7C_3 стосовно зношуваної поверхні розглянуто у ряді робіт. За даними [378], зносостійкість чавуну 300X20ДНФ при розташуванні осі с карбідів Me_7C_3 перпендикулярно робочій поверхні приблизно в 3 рази вище, ніж при паралельному та в 1,5 рази вище, ніж при неорієнтованому розташуванні карбідів. З розглянутих публікацій випливає, що застосовуючи високохромисті чавуни, в яких карбідна фаза цементитного типу заміщається спеціальними карбідами типу Me_7C_3 і Me_{23}C_6 , за умови чітко вираженої спрямованої кристалізації можна істотно підвищити зносостійкість виробів (рис.1). При виробництві масивних виливків, таких як валки прокатних листових і широкосмугових станів, здійснити спрямовану кристалізацію при формуванні робочого шару можливо, використовуючи тільки метод відцентрового лиття [361].

Твердість карбідів типу Me_3C і Me_7C_3 залежить від концентрації хрому і досягає 800-1000HV та 1300-1800HV відповідно [379]. Зі збільшенням концентрації хрому вона зростає. Залежність твердості від концентрації хрому у разі карбідів Me_3C виражена значно сильніше, ніж у випадку карбідів Me_7C_3 . Найважливішу роль грають розміри структурних складових. При зменшенні розмірів евтектичних колоній і надлишкових фаз суттєво підвищуються характеристики міцності чавунів.

В γ -залізі хром має необмежену розчинність, а в α -залізі розчиняється його до 12% [380]. Зміст хрому в аустеніті зростає зі збільшенням його частки в чавуні за лінійним законом. Кількість карбідів визначається, головним чином, вмістом вуглецю, а тип карбідів – концентрацією хрому. Однак, при одній і тій же концентрації вуглецю кількість карбідів підвищується при збільшенні концентрації хрому. За даними досліджень [381] у чавунах із вмістом хрому 18-24% (при 2,8-3,2% вуглецю) кристалізується максимальна кількість карбідів Me_7C_3 (концентрація хрому в цих карбідах становить 35-40%) за відсутності заевтектичних карбідів, що забезпечує отримання високих властивостей

міцності. При меншому вмісті хрому в чавуні карбіди збіднені хромом, що призводить до зниження їх механічних властивостей. Крім того, внаслідок ліквідації можливе утворення карбідів типу Me_3C , які за міцністю значно поступаються карбідам Me_7C_3 . При більшому вмісті хрому і вуглецю в структурі чавуну спостерігається поява крихких голок заевтектичних карбідів, внаслідок чого очікується погіршення властивостей чавуну. Починаючи з 18-20% вмісту хрому, поряд з карбідами Me_7C_3 виділяються і Me_{23}C_6 .

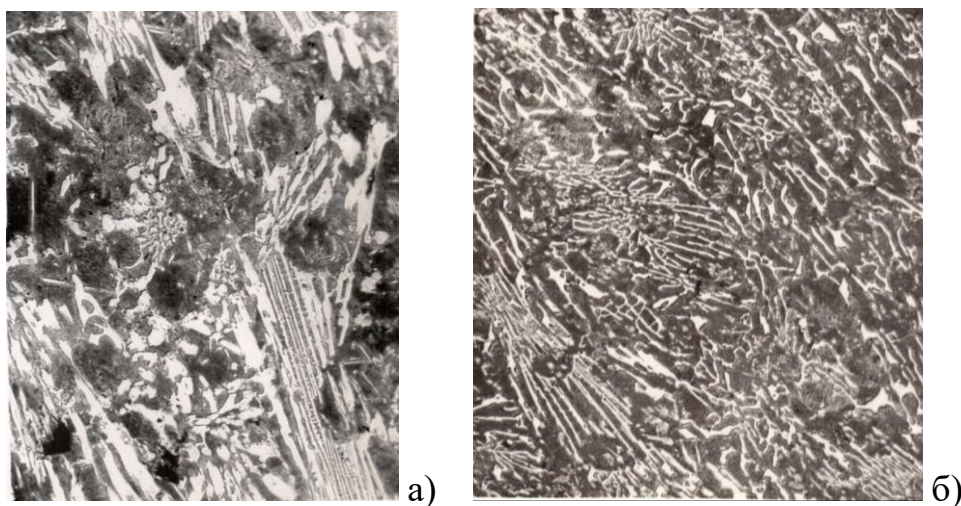


Рисунок 1 - Структура робочої поверхні високохромистого валка: а) стаціонарнолитого виливка (видні включення точкового графіту); б) – відцентроволитого

Службові властивості білих чавунів залежать не тільки від кількості та типу карбідів, а й від структури металевої матриці. Її вплив на властивості хромистих чавунів розглянуто в [382]. При постійному вмісті вуглецю зі збільшенням концентрації хрому рівень твердості металу підвищується. Це пов'язано зі зростанням стійкості аустеніту зі збільшенням вмісту хрому в чавуні (від 12,5 до 20%). Внаслідок цього кількість продуктів розпаду у структурі зменшується. Аналіз результатів дослідження високохромистих чавунів з різною структурою металевої основи за однакових характеристик карбідної фази показав, що зносостійкість зростає лінійно з підвищенням твердості металевої матриці. Вона значно м'якша за масивні карбіди, тому, незважаючи на їх високу твердість, має місце і її знос за рахунок викришування карбідів і дряпання

матеріалу металевої матриці. Цей тип зношування визначається механічними властивостями матеріалу матриці. Якщо основа не має достатньої твердості, то карбіди з поверхні можуть викришуватися, не реалізуючи своєї високої зносостійкості. Висока зносостійкість є необхідною, але не достатньою умовою працездатності валків, тому при виборі складу чавуну слід враховувати його характеристики міцності, схильність до викришування. У роботах [361, 383, 384] наголошується, що міцність монотонно підвищується із зменшенням вмісту вуглецю, а хром, починаючи з 15%, практично не впливає на неї.

Прогартуваність для білих чавунів є важливою технологічною та службовою властивістю. Зі зміною вмісту вуглецю в чавуні змінюється концентрація хрому в металевій матриці, що впливає на прогартуваність. При легуванні лише хромом неможливо отримати високий рівень властивостей у виливках. Щоб отримати необхідне співвідношення структурних складових та задані властивості карбідної фази, подрібнити зерно, вводять додаткові легуючі домішки та модифікатори. Механічні та службові властивості виливків значною мірою залежать від розподілу легуючих елементів між фазами чавуну. Для отримання високої прогартуваності необхідно вводити елементи, що розширюють γ - область і збільшують стійкість аустеніту, наприклад, Mo, Ni, Mn. Зі зменшенням вмісту вуглецю позитивний вплив цих легуючих елементів на прогартуваність зростає, що пов'язано з особливостями їх розподілу між карбідами і металевою матрицею. Найбільш повне уявлення про вплив хімічного складу матеріалу на структуру можна отримати при аналізі ролі основних та легуючих домішок у кожному конкретному випадку.

У процесі кристалізації чавуну відбувається перерозподіл хрому. Більшість його входить до складу карбідної фази. Міжфазовий розподіл хрому у високолегованих чавунах мало вивчений. За даними [385] коефіцієнт розподілу між карбідами типу Me_3C і аустенітом дорівнює 2.6, між карбідами Me_7C_3 і аустенітом – 4.2. Вміст хрому в карбіді Me_7C_3 може змінюватись у широких межах (табл. 1).

Таблиця 1- Вміст хрому в карбіді Me_7C_3 в залежності від загальної концентрації

Вміст хрому в карбіді Me_7C_3 , %	Загальний вміст хрому в чавуні, %
26,2	10,5
39,1	18,0
46,8	24,6
53,7	28,5

У ряді робіт [386 ,387] розглянуто питання щодо ступеню неоднорідності розподілу елементів у матриці високохромистих сплавів. Розподіл елементів значно різниться у центрі зерна первинного аустеніту та вздовж евтектичних карбідів. Вздовж поверхні розділу різко зменшується вміст хрому та вуглецю, а також підвищується концентрація кремнію, фосфору та сірки. Необхідно також враховувати, що і при відцентровому литті можлива ліквідація хімічних елементів, що залежить від частоти обертання виливниці. За даними [361] найменша хімічна та структурна неоднорідність забезпечується при частоті обертання форми при кристалізації понад 380 об/хв.

Умови кристалізації впливають на первинну структуру високохромистих чавунів. Найбільш значущий фактор – швидкість охолодження. Діапазон швидкостей охолодження реальних виливків в інтервалі кристалізації становить 0,2-200°C/хв. Швидкість охолодження впливає як на ступінь диференціювання структури в евтектиці і розмір евтектичних колоній (внаслідок зональної і дендритної ліквідації елементів), так і на дислокаційну структуру. Встановлено, що більша швидкість кристалізації відповідає робочому шару валка, а низька характерна для центральної зони. При високих швидкостях охолодження чавуну може спостерігатися розтріскування, пов'язане з виникненням поверхневих напружень, незважаючи на те, що розтріскування може носити локальний мікроскопічний характер, воно збільшує схильність до викришування та руйнування деталей при їх експлуатації.

8.1.5 Оцінка напруженого стану у масивних виливках прокатних валків при кристалізації чавуну та впливу різних факторів на його величину

Для підвищення експлуатаційної стійкості чавунних прокатних валків важливо провести оцінку термічних напружень, що виникає при їх кристалізації. Причиною виникнення напружень є нерівномірний розподіл температур перерізу масивної виливки при її охолодженні. Внаслідок цього та неодночасного протікання структурних перетворень, виникають напруження при кристалізації чавунних масивних виливків, що впливають на формування структури та рівень твердості у виробі. Враховуючи жорсткі вимоги до експлуатаційних характеристик прокатних валків, що включають, насамперед, високу зносостійкість та твердість контактної поверхні, необхідно правильно коригувати кінетику зміни температури у виробі під час охолодження. Для підвищення експлуатаційної стійкості чавунних прокатних валків важливо провести оцінку температурних полів та напружень, що виникають в процесі їх кристалізації. Оскільки експериментальні методи визначення напруженого стану в тілі масивних виливків при кристалізації чавуну утруднені через складність та дорожнечу проведення експериментів, запропоновано методику теоретичного визначення технологічних параметрів кристалізації, яка дозволяє оцінити напружений стан виливку [388]. Математичну модель термомеханічних процесів, що виникають під час кристалізації чавунного валка, з розрахунком температурного поля та напружено-деформованого стану, будували на основі теорії пластичності Прандтля – Рейса.

8.1.5.1 Моделювання температурних полів системи виливка – ливарна форма в період кристалізації валка

У внутрішніх точках координат розподіл температури підпорядковується одновимірному рівнянню теплопровідності, яке для тіл з осьовою симетрією (до них відносяться і прокатні валки) зручно записати в циліндричній системі координат. Це рівняння у частинних похідних має вигляд

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

де r -радіус (координата) впродовж товщини виливка й кокілю, м; τ —час, год.; $T = T(r, \tau)$ - температура в точках з координатою r в момент часу τ , °C; c - питома теплоємність, кДж/(кг·°C); λ - теплопровідність матеріалу, кДж/(м·год·°C).

Баланс тепла при фазових переходах враховували змінами питомої теплоємності (272 кДж/кг) в інтервалі між температурами ліквідус і солідус

$$c = \begin{cases} c_g & T > t_l \\ \frac{c_g + c_{lv}}{2} + \frac{272}{t_l - t_s} & t_s \leq T \leq t_l \\ c_{lv} & T < t_s \end{cases} \quad (2)$$

де $c_g = 0,92$ кДж/(кг·°C); $c_{lv} = 0,84$ кДж/(кг·°C); $t_s = 1150^\circ\text{C}$ - температура солідус чавуну; $t_l = 1250^\circ\text{C}$ - температура ліквідус чавуну.

В інтервалі температур аналізованих фазових перетворень (770 - 756°C) при кристалізації чавуну також виділялося 84 кДж/кг. У цьому проміжку змінювалася теплоємність чавуну [389]:

$$c = \begin{cases} c_{lv} & t_{l1} < T < t_s \\ c_{lv} + \frac{84}{t_{l1} - t_{s1}} & t_{s1} \leq T \leq t_{l1} \\ c_{lv} & T < t_{s1} \end{cases} \quad (3)$$

де $t_{l1} = 770^\circ\text{C}$ - та $t_{s1} = 756^\circ\text{C}$ - температури початку та завершення фазових перетворень чавуну; γ - щільність чавуну, кг/м³:

$$\gamma = \begin{cases} 6900 & T > t_l \\ \frac{6900 + 7200}{2} = 7050 & t_s \leq T \leq t_l \\ 7200 & T < t_s \end{cases} \quad (4)$$

Теплопровідність в залежності від температури розраховували [389]:

$$\lambda = 45 - 25 \cdot (1200 - T) / 1200 \quad (5)$$

Удельная теплоемкость материала кокиля принимали равной 0,67 кДж/(кг·°C).

Розрахунок температурного поля у виливку проводили у два етапи. На першому - оцінювали градієнт температур за радіусом у кожний момент часу для виливки та кокілю. На другому етапі за відомим заздалегідь часом вилучення виливки з кокіля розрахунок градієнта температур виробляли тільки для

виливки. Незалежно від радіусу виливки розрахунок розподілу у ній температур виробляли до 400 год включно (кінця кристалізації).

На першому етапі розрахунок теплопровідності для виливки та кокілю були представлені у вигляді диференціальних рівнянь:

$$c\gamma \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r_1} \right) \quad (6)$$

$$c\gamma \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r_2^2} + \frac{1}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r_2} \right) \quad (7)$$

$$0 \leq r_1 \leq r_o$$

$$r_o < r_2 \leq r_o + h_k,$$

де $T_1 = T_1(r_1, \tau)$ - температура відливка, °C; $T_2 = T_2(r_2, \tau)$ - температура кокілю, °C; r_o - радіус відливка, м; h_k - товщина кокілю, м.

Під час розрахунку температури було обрано такі початкові умови:

$$T_1(r_1, 0) = T_z, \quad (8)$$

де T_z - температура чавуну перед розливанням в кокіль.

$$T_2(r_2, 0) = T_k, \quad (9)$$

де T_k - температура кокілю перед розливанням чавуну.

Граничні умови.

Відсутність у центрі виливка теплового потоку (умова симетрії)

$$\lambda \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial r_1} = 0 \quad (10)$$

Наявність підживлення рідким металом із прибутку до завершення кристалізації на досить малому інтервалі біля центру виливка:

$$T_1(0, \tau) = t_s \quad (11)$$

Після закінчення кристалізації приймали попередню умову симетрії. Як рівняння для щільності приймали:

$$\frac{\partial(\rho \Delta T)}{\partial \tau} = \gamma \frac{\partial \Delta T}{\partial r}, \quad (12)$$

де τ - час; r - радіус; ρ - щільність; ΔT - різниця температур у сусідніх точках розрахункової області; γ - поправочний коефіцієнт.

Рівняння відповідає температурам між ліквідусом та солідусом. На внутрішній межі кокіля ($r = r_o$), де практично відразу виникає зазор між виливком і кокілем, тепловий потік виражали через теплове випромінювання:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 3.8 \left[\left(\frac{T_1(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 \right],$$

(13)

де 3.8 - розмірний коефіцієнт, що залежить від питомої теплоємності та коефіцієнта чорноти, що приймається рівним 0,7-0,8.

На зовнішній межі кокілю рівняння теплового потоку має вигляд:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 3.8k \left[\left(\frac{T_2(r_o + h_k, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

(14)

де T - температура на зовнішній межі; T_{cp} - температура навколишнього середовища (прийняли 30°C); 3.8 - розмірний коефіцієнт, що залежить від питомої теплоємності та коефіцієнта чорноти, що приймається рівним 0,7-0,8; k - коефіцієнт конвективного теплообміну ($k = 2$).

На другому етапі розрахунку розподілу температур використовували рівняння теплопровідності, що мало вигляд:

$$c\gamma \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r_1} \right)$$

(15)

де $0 \leq r_1 \leq r_o$, $T_1 = T_1(r_1, \tau)$ - температура відливка, °C; r_o - радіус відливка, м.

Початковою умовою при розрахунку приймали температуру виливка перед вилученням її з кокілю.

Граничні умови.

У центрі виливки приймали відсутність теплового потоку (або умову симетрії):

$$\lambda \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial r_1} = 0$$

(6)

На зовнішній межі виливка рівняння теплового потоку виразили:

$$\lambda \frac{\partial T_1}{\partial r_1} = 3.8k \left[\left(\frac{T_1(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

(17)

де $T_1(r_o, \tau)$ - температура на зовнішній межі; T_{cp} - температура навколишнього середовища (прийняли 30°C); $3,8 - 3,8$ - розмірний коефіцієнт, що залежить від питомої теплоємності та коефіцієнта чорноти, що приймається рівним $0,7-0,8$; k - коефіцієнт конвективного теплообміну ($k = 2$).

Задачу (1) вирішували методом скінченних різниць за явною різницевою схемою. Для теоретичного розрахунку поставленої задачі було використано графічне представлення моделі для виділення елемента системи виливок – ливарна форма (рис.2).

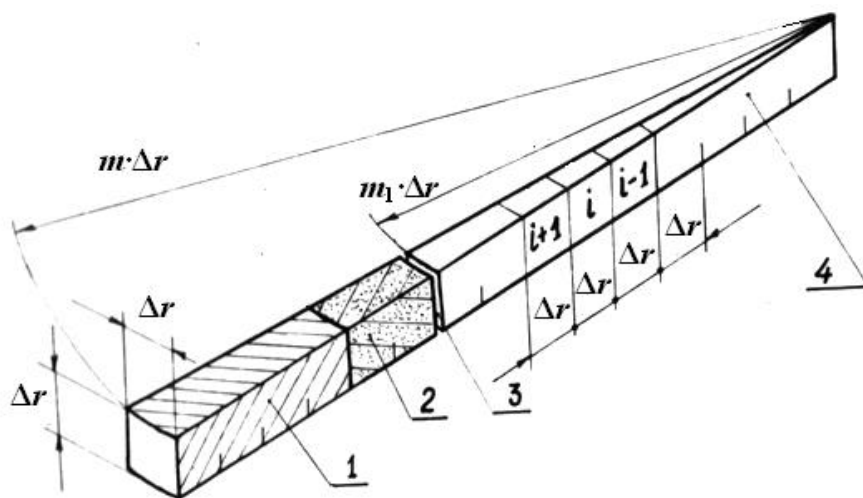


Рисунок 2 - Розрахункова схема одновимірної задачі: 1 – циліндр; 2 – теплоізоляційне покриття; 3 – повітряний проміжок; 4 – валик.

Для цього область рішення було розбито m точками на $m-1$ рівних частин (див. рис. 2). Індекс i відноситься до i -ї точки області. Час, що відноситься до температури, приведено в скобках. Радіусу виливка (r_o) відповідає m_1 точок.

Крок за координатою Δr задано як:

$$\Delta r = \frac{L}{m-1}, \quad (18)$$

де L – довжина досліджуваної області, мм. Координата в i -й точці області:

$$r_i = r_o + (i-1)\Delta r \quad (19)$$

Крок по часу $\partial \tau$ приблизно дорівнює величині $\Delta \tau$, що вибирається із умов стійкості різницевої схеми, де максимум береться з усієї сукупності точок за i :

$$\max\left(\frac{\lambda_i \Delta \tau}{c_i \gamma_i \Delta r^2}\right) < 1 \quad (20)$$

Відповідно (19), знаходимо

$$\Delta \tau < \min\left(\frac{c_i \gamma_i}{\lambda_i}\right) \cdot \Delta r^2 \quad (21)$$

Тоді рівняння (1) для точки с номером i в скінчено-різницевій формі є:

$$c_i \gamma_i \frac{T_i(\tau + \Delta \tau) - T_i(\tau)}{\Delta \tau} = \lambda_i \left[\frac{T_{i+1}(\tau) - 2T_i(\tau) + T_{i-1}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1}(\tau) - T_{i-1}(\tau)}{2r_i \Delta r} \right] \quad (22)$$

З рівняння (22) за відомими значеннями $T_i(\tau)$ в попередній момент часу знаходили $T_i(\tau + \Delta \tau)$ - в наступній момент часу за формулою:

$$T_i(\tau + \Delta \tau) = T_i(\tau) + \frac{\lambda_i \Delta \tau}{c_i \gamma_i} \left[\frac{T_{i+1}(\tau) - 2T_i(\tau) + T_{i-1}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1}(\tau) - T_{i-1}(\tau)}{2r_i \Delta r} \right] \quad (23)$$

Попередньо $T_i(\tau)$ задавали із вихідної умови.

Рішення задачі (6)-(14) скінчено-різницевим способом. Вихідна умова:

$$T_{1i}(0) = T_z \text{ для } 1 \leq i \leq m_1 \quad (24)$$

$$T_{2i}(0) = T_k \text{ для } m_1 + 1 \leq i \leq m \quad (25)$$

Розрахунок за (23) для T_{1i} проводили в точках $2 \leq i \leq m_1 - 1$, а для T_{2i} - в точках $m_1 + 2 \leq i \leq m - 1$. Для точки $i=2$ (центр виливка) в силу умови симетрії (10):

$$T_{1i-1} = T_{12-1} = T_{12} \quad (26)$$

Рівняння (23) приймає вигляд:

$$T_{12}(\tau + \Delta \tau) = T_{12}(\tau) + \frac{\lambda_2 \Delta \tau}{c_2 \gamma_2} \left[\frac{T_{13}(\tau) - 2T_{12}(\tau) + T_{12}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{13}(\tau) - T_{12}(\tau)}{2r_2 \Delta r} \right] \quad (27)$$

Координата в точці $i=2$ дорівнює:

$$r_2 = (i - 1)\Delta r = (2 - 1)\Delta r = \Delta r \quad (28)$$

Розрахунок граничної умови (13) для T_{1i} в точці $i = m_1 - 1$ (межа виливка з кочілем). Позначимо праву частину формули (13) через q_1 :

$$q_1 = 3.8 \left[\left(\frac{T_1(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (29)$$

В скінчено-різницевого вигляді ця формула:

$$q_1 = 3.8 \left[\left(\frac{T_{1m_1-1}(\tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{2m_1+2}(\tau) + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (30)$$

За допомогою формули (30) можна розрахувати значення q_1 на попередньому кроку за часом. Оскільки для температури T_{1m_1-1} умова (13) в скінчено-різницевого вигляді є:

$$\lambda_{m_1-1} \frac{T_{1m_1-1} - T_{1m_1}}{\Delta r} = q_1,$$

(31)

$$\text{то} \quad T_{1m_1} = T_{1m_1-1} - \frac{q_1 \Delta r}{\lambda_{m_1-1}}, \quad (32)$$

розраховане значення для T_{1m_1} підставляємо в різницеву формулу (23) замість $T_{i+1}(\tau)$ та отримуємо:

$$T_{1m_1-1}(\tau + \Delta \tau) = T_{1m_1-1}(\tau) + \frac{\lambda_{m_1-1} \Delta \tau}{c_{m_1-1} \gamma_{m_1-1}} \left[\frac{T_{1m_1-1}(\tau) - \frac{q_1 \Delta r}{\lambda_{m_1-1}} - 2T_{1m_1-1}(\tau) + T_{1m_1-2}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{1m_1-1}(\tau) - \frac{q_1 \Delta r}{\lambda_{m_1-1}} - T_{1m_1-2}}{2r_{m_1-1} \Delta r} \right] \quad (33)$$

$$r_{m_1-1} = (m_1 - 2) \Delta r \quad (34)$$

Оскільки для температури T_{2i} по радіусу r_{m_1+2} умова (13) в скінчено-різницевого вигляді є:

$$\lambda_{m_1+2} \frac{T_{2m_1+1} - T_{2m_1+2}}{\Delta r} = q_1, \quad (35)$$

отримали

$$T_{2m_1+1} = T_{2m_1+2} + \frac{q_1 \Delta r}{\lambda_{m_1+2}}, \quad (36)$$

Це значення для T_{2m_1+1} підставляємо в різницеву формулу (23) замість $T_{i-1}(\tau)$:

$$T_{2m_1+2}(\tau + \Delta\tau) = T_{2m_1+2}(\tau) + \frac{\lambda_{m_1+2}\Delta\tau}{c_{m_1+2}\gamma_{m_1+2}} \left[\frac{T_{2m_1+3}(\tau) - 2T_{2m_1+2}(\tau) + T_{2m_1+1}(\tau) + \frac{q_1\Delta r}{\lambda_{m_1+2}}}{\Delta r^2} + \frac{T_{2m_1+3}(\tau) - T_{2m_1+2}(\tau) - \frac{q_1\Delta r}{\lambda_{m_1+2}}}{2r_{m_1+2}\Delta r} \right] \quad (37)$$

$$r_{m_1+2} = (m_1 + 1)\Delta r \quad (38)$$

Урахування граничної умови (14) для T_{2i} в точці $i = m - 1$ (зовнішня межа кокілю). Позначимо праву частину формули (14) через q_2

$$q_2 = 3.8k \left[\left(\frac{T_{2m-1}(R_o + h_k, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (39)$$

Розрахунок значення q_2 можна провести на попередньому кроку за часом

Для T_{2m} умова (14) скінчено-різницевого вигляді є

$$\lambda_{m-1} \frac{T_{2m-1} - T_{2m}}{\Delta r} = q_2, \quad (40)$$

отримуємо

$$T_{2m} = T_{2m-1} - \frac{q_2\Delta r}{\lambda_{m-1}} \quad (41)$$

Температуру на зовнішній межі приймали рівну в перед граничній точці при розбитті області рівномірні сітки. Отримане значення для T_{2m} підставляли в різницеву формулу (23) замість $T_{i-1}(\tau)$:

$$T_{2m-1}(\tau + \Delta\tau) = T_{2m-1}(\tau) + \frac{\lambda_{m-1}\Delta\tau}{c_{m-1}\gamma_{m-1}} \left[\frac{T_{2m-1}(\tau) - \frac{q_2\Delta r}{\lambda_{m-1}} - 2T_{2m-2}(\tau) + T_{2m-3}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{2m-1}(\tau) - \frac{q_2\Delta r}{\lambda_{m-1}} - T_{2m-2}(\tau)}{2r_{m-1}\Delta r} \right], \quad (42)$$

де координата точки $i=m-1$ (зовнішня межа кокіля) дорівнює:

$$r_{m-1} = (m - 2)\Delta r \quad (43)$$

На другому етапі розв'язання задачі (15)-(17) скінчено-різницеvim методом проводили обчислення аналогічно - першому. У цьому випадку розрахунки виконували тільки для виливка.

8.1.5.2 Моделювання одновимірної задачі напружено-деформованого стану в процесі кристалізації валка

Побудову математичної моделі напружено-деформованого стану (НДС) проводили, використовуючи модель пластичності, що описує поведінку матеріалу при пружно-пластичних деформаціях (пружне середовище при

навантаженні та жорстко-пластичне - після розвантаження).

Розрахунок НДС проводили в геометрично лінійній постановці. Він ґрунтується на фізичному принципі мінімуму роботи потенційної енергії за умови відсутності зовнішніх сил. Тому мінімізацію роботи деформації проводили лише з внутрішніх сил:

$$A = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \sigma_i v_i, \quad (44)$$

де ε_i - деформація та σ_i - напруження в i -м перерізі; v_i - об'єм елемента (сектора циліндра) в i -м перерізі. В безперервному випадку сума (44) є інтегралом по об'єму. Радіус виливка r_0 поділено m_1 точками на m_1-1 рівних частин з кроком

$\Delta r = \frac{r_0}{m_1 - 1}$. Індекс i відноситься до i -ї точки радіуса (див. рис.2). Координата в i -

й точці області розраховується за формулою:

$$r_i = (i - 1)\Delta r$$

(45)

З геометричних міркувань об'єм виділеного i -го елемента було представлено:

$$v_i = (r_{i+1}^2 - r_i^2)l = [(i+1)^2 - i^2] \frac{r_0^2}{(m-1)^2} l = (2i+1) \frac{r_0^2}{(m-1)^2} l, \quad (46)$$

де l - довжина вздовж осі виливки, приймається $l=1$ мм.

У представленій моделі НДС деформації складаються із двох складових: деформації навантаження та деформації розвантаження. Причому навантаження і розвантаження відбуваються одночасно: після застосування деформацій навантаження відразу розвантажуються ті з них, які перевершують гранично пружну деформацію матеріалу, в результаті чого у виділеному елементі залишаються залишкові напруження і відбувається зміна його лінійних розмірів. Зміна довжини вздовж радіусу виливки i -го розрахункового елемента, що спричинена деформацією матеріалу внаслідок нерівномірності теплового поля, за вибраний період $\Delta \tau$ знаходили за формулою:

$$\Delta r_i = \Delta r \cdot [T_i(\tau + \Delta \tau) - T_i(\tau) - \Delta T_{\text{н\delta}}] \beta,$$

(47)

де $T_i(\tau + \Delta\tau)$ - температура i -го перерізу в даний момент часу $\tau + \Delta\tau$; $T_i(\tau)$ - температура i -го перерізу в попередній момент часу τ ; ΔT_{cp} - середнє збільшення температури, °С, при якому досягається мінімум роботи деформації; β - коефіцієнт лінійного розширення, для чавуну $\beta = 11 \cdot 10^{-6}$, °С⁻¹;

У роботі використовували підхід до розв'язання задачі, при якому представляли повну деформацію навантаження у i -му перерізі у вигляді суми:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta r_i}{\Delta r} + \varepsilon_{oi} + \varepsilon_{ci}, \quad (48)$$

де перший доданок у правій частині цього виразу є збільшення деформації за обраний період розрахунку $\Delta\tau$; ε_{oi} - залишкова деформація в момент часу τ на попередньому етапі розрахунку; ε_{ci} - структурна деформація в момент часу $\tau + \Delta\tau$. Граничними умовами було прийнято $T_i(\tau + \Delta\tau) < 770^\circ\text{C}$ и $T_i(\tau) < 770^\circ\text{C}$.

Параметром, що варіюється, є число ΔT_{cp} . Значення ΔT_{cp} визначали з умови мінімуму роботи деформацій шляхом її зміни від ΔT_{min} до ΔT_{max} із досить малим кроком пошуку 0.1°C . Для зменшення машинного часу розрахунку проміжок варіювання змінювали залежно від максимальної температури. На початку, у момент заливання металу в кокіль, приймали $\Delta T_{max} = 100^\circ\text{C}$. Але оскільки за період часу до вилучення виливка з кокілю температура на поверхні різко змінюється, були відкориговані значення параметра ΔT_{max} : через 40 год приймали $\Delta T_{max} = 25^\circ\text{C}$, а через 200 год - $\Delta T_{max} = 12,5^\circ\text{C}$.

Структурну деформацію ε_{ci} за час розглянутих фазових перетворень, відповідно інтервалу температур $770-756^\circ\text{C}$, враховували в кожній точці i один раз при $T_i(\tau) \geq 756$, а $T_i(\tau + \Delta\tau) < 756$. В цей момент її приймали однаковою з граничною пружною деформацією ε_{02} : $\varepsilon_{ci} = \varepsilon_{0.2}$. В інші моменти часу, виключаючи зазначений, $\varepsilon_{ci} = 0$. Відповідно до закону Гука для аналізованої моделі напружень навантаження в i -му перерізі можна подати у вигляді:

$$\sigma_i = E(T_i)\varepsilon_i, \quad (49)$$

де $E(T_i)$ - модуль пружності, МПа, що залежить від температури і розрахований

за емпіричною формулою [390]:

$$E(T_i) = 2,3023 \cdot 10^5 - 3,706 \cdot 10^{-2} \cdot T_i - 8,92 \cdot 10^{-4} \cdot T_i^2; \quad (50)$$

T_i - середня температура в i -й точці за час від τ до $\tau + \Delta\tau$, тобто

$$T_i = \frac{T_i(\tau) + T(\tau + \Delta\tau)}{2} \quad (51)$$

В основі розрахунку залишкових деформацій є припущення, що через нерівномірність теплового поля одночасно з деформацією навантаження відбувається деформація розвантаження. Якщо деформація перевищує гранично пружну деформацію, вона приймається рівної їй. На наступному етапі навантаження отримані залишкові деформації додавалися до значення ε_i , розрахованому за (48).

Залишкові деформації розраховували так, якщо при знайдених подовженнях Δr_i розрахункового елемента величина:

$$|\varepsilon_i| \leq \varepsilon_{0.2}, \text{ то } \varepsilon_i = \varepsilon_{0.2};$$

$$\text{в протилежному випадку, якщо: } |\varepsilon_i| > \varepsilon_{0.2}, \text{ то } \varepsilon_{oi} = \varepsilon_{0.2} \cdot \frac{\varepsilon_i}{|\varepsilon_i|},$$

$$(52)$$

(розвантаження до гранично пружної деформації), де $\varepsilon_{0.2}=0,001$ - величина гранично пружної деформації для чугунов.

Залишкові напруження σ_{oi} при розвантаженні, відповідно визначеним деформаціям, розраховували за формулами:

$$\sigma_i, \text{ якщо } |\varepsilon_i| \leq \varepsilon_{0.2}$$

$$\sigma_{oi} = \varepsilon_{0.2} \cdot E_i \cdot \frac{\sigma_i}{|\sigma_i|}, \text{ якщо } |\varepsilon_i| > \varepsilon_{0.2} \quad (53)$$

За алгоритмом розробленої програми, рішення розглянутих задач відбувалися наступним чином.

На першому етапі математичного моделювання НДС вирішували завдання розрахунку температурних полів, що виникають у системі виливок – ливарна форма. Було два масиви температур $T_i(\tau)$ и $T_i(\tau + \Delta\tau)$. Спочатку, даними, розрахованими за формулами (24), (25), заповнювали масив $T_i(\tau)$. Потім, за

формулою (23) з урахуванням граничних умов, розраховували масив $T_i(\tau + \Delta\tau)$. Далі масиву $T_i(\tau)$ надавали значення масиву $T_i(\tau + \Delta\tau)$.

На другому етапі моделювання проводили оцінку напруженого стану, що виникає в процесі кристалізації виливка. Згідно принципу мінімуму роботи деформації (44), та з урахуванням отриманих на першому етапі обчислень масивів температурних полів, за формулами (48) та (49) розраховували масиви деформацій та напружень навантаження у момент часу τ . Далі за формулами (52), (53) заповнювали масиви залишкових деформацій та напружень у момент часу τ . З урахуванням цих отриманих масивів залишкових деформацій на наступному етапі навантаження розраховували масиви деформацій та напружень у момент часу $\tau + \Delta\tau$ за формулами (48) и (49). Алгоритм повторювали задану кількість разів.

Використовуючи розроблені математичні моделі, виконано 42 варіанти розрахунків щодо вирішення одновимірної задачі з НДС. Об'єктом дослідження є відцентроволиті листопрокатні чавунні валки $\varnothing 1060$ мм і 800 мм. Величини теплофізичних констант, використаних для розрахунку, наведені в табл.2.

Таблиця 2 - Величина теплофізичних констант системи валок-кокіль

Параметри	Значення констант або розрахункова формула
Температура ліквідусу чавуну	1250°C
Температура солідусу чавуну	1150°C
Температура початку перлітного перетворення	770°C
Температура кінця перлітного перетворення	756°C
Теплоємність рідкого чавуну	0,92 кДж/кг°C
Теплоємність валкового чавуну	0,84 кДж/кг°C
Теплоємність матеріалу кокілю	0,63 кДж/кг°C
Теплоємність намазування кокілю	1,09 кДж/кг°C
Теплота кристалізації чавуну	271,7 кДж/кг
Теплота фазового перетворення чавуну валка	83,6 кДж/кг
Коефіцієнт теплопровідності чавуну в інтервалі кристалізації	62,7 кДж/м×год°C

Продовження таблиці 2

Коефіцієнт теплопровідності чавуну кокілю	$K=(45-40) \times T/1150$
Коефіцієнт теплопровідності намазки	5,02 кДж/м×год°С
Питома вага чавуну у твердому стані	7200 кг/м ³
Питома вага чавуну в рідкому стані	6900 кг/м ³
Питома вага матеріалу намазки кокілю	1600 кг/м ³

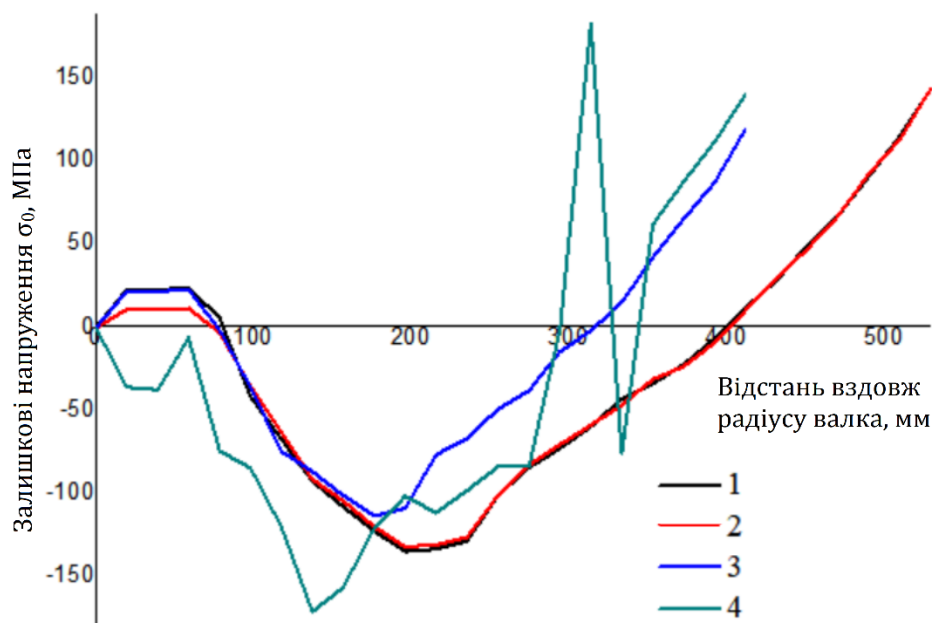


Рисунок 3 Залишкові напруження (І роду) по перерізу валків для варіантів розрахунку (відповідно даних табл.3, виділено сірим кольором) №15 (1 і 2) і №38 (3 і 4) у різні моменти часу (τ), при $\Delta\tau = 0,4\text{с}$ (табл. 4): 1- τ_1 , 2- τ_3 , 3- τ_1 , 4- τ_2 .

В табл. 3 наведено дані розрахунку одновимірної задачі НДС, на рис.3 - схема утворення залишкових напружень σ_{0i} при кристалізації в поперечному перерізі валка у фіксовані моменти часу τ (табл. 4) на прикладі двох варіантів розрахунку (див. табл. 3, №№15 та 38). По осях: абсцис відкладена відстань вздовж радіуса валка i -го розрахункового елемента (r_i), мм; ординат – величина залишкового напруження, МПа. На графіках стискаючі напруження показані зі знаком "-", а розтягуючі – "+".

Аналіз ливарних залишкових напружень, показав, що максимальні стискаючі залишкові напруження (див. рис. 3) спостерігаються на половині довжини радіусу, тоді як максимальні розтягуючі - поблизу робочої поверхні валків. Встановлено, що для виливків з меншим діаметром (рис.3, графіки 3 і 4)

спостерігається більший розкид значень залишкових напружень по перерізу валка у міру охолодження виливка. Такий розподіл залишкових напружень (І роду) по перерізу валка вимагає їх обліку при призначенні параметрів термічної обробки. Головним є призначення ступеня витримки виливка задля забезпечення повільного процесу його рівномірного прогріву.

Оцінку впливу на НДС прокатних валків діаметром 800мм та 1060мм різних параметрів при кристалізації проведено шляхом виконання статистичної обробки вибірки валків (42 шт., деякі приклади див. табл.3). Як змінні були обрані: товщина кокілю, температура кокілю перед розливом і температура металу, що розливається у форму, час охолодження валка у формі. Результати множинного кореляційного аналізу показали існування між товщиною кокілю, температурою металу, що розливається у форму, вихідною температурою кокілю, часом охолодження валка у формі і напружено-деформованим станом після кристалізації валка лінійного зв'язку.

Залишкові напруження (І роду) розтягування зовнішнього шару ($\sigma_{\text{ост.розт.}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{ост.розт.}} = 492,4 + 0,07h_{\text{кок}} - 1,9\tau_{\text{вийм}} - 1,8t_{\text{розл}} - 0,14t_{\text{кок}}, R=0,76 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$\sigma_{\text{ост.розт.}} = 11,7 - 0,003h_{\text{кок}} - 3\tau_{\text{вийм}} + 0,15t_{\text{розл}} + 0,25t_{\text{кок}}, R=0,75 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм};$$

де $h_{\text{кок}}$ – товщина кокілю, мм; $\tau_{\text{вийм}}$ – час охолодження виливка, год;

$t_{\text{розл}}$ - температура розливання, °С; $t_{\text{кок}}$ – вихідна температура кокілю, °С.

Таблиця 3 –Результати розрахунку НДС

Номер позиції*															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1060	100	1380	140	36	12,8	-109	74,4	154	399,6	3983	154	295,2	5	100
2	1060	100	1380	140	54	12,8	-133	66,4	77	033,6	3160	74	352,4	3	40
3	1060	100	1430	140	72	10,4	-146	75,2	153	031,6	2311	130	327,2	3	40
4	1060	100	1380	100	72	12,8	-092	74,0	140	400,0	2446	121	334,0	7	40
5	1060	100	1420	140	72	12,8	-146	74,4	116	035,2	0331	50	368,0	7	0
6	1060	100	1380	180	72	12,8	-109	74,4	121	399,6	2487	99	342,0	9	40
7	1060	100	1430	140	72	14,8	-79	73,2	153	031,6	2400	140	323,6	7	40
8	1060	100	1430	180	72	14,8	-146	75,2	111	037,2	2324	52	366,8	3	0
9	1060	100	1380	140	91	12,8	-133	66,4	94	033,6	2657	77	354,8	5	100
10	1060	100	1380	140	110	12,8	-118	112,0	154	399,6	2635	13	392,8	5	100
11	1060	200	1380	140	36	14,4	-132	80,0	192	356,8	4196	189	252,0	3	120
12	1060	200	1380	140	54	14,4	-150	112,0	88	400,0	3856	88	333,6	5	120
13	1060	200	1320	140	72	11,6	-102	77,6	153	056,8	2410	110	339,2	3	80
14	1060	200	1380	100	72	14,4	-134	80,0	84	400,0	2516	71	357,6	3	80
15	1060	200	1380	140	72	14,4	-146	74,4	152	042,4	1272	130	331,2	1	40

Продовження таблиці 3

16	1060	200	1380	180	72	14,4	-134	80,0	87	045,2	2513	74	356,4	3	80
17	1060	200	1430	140	72	16,4	-123	81,2	110	399,6	2462	84	350,4	5	80
18	1060	200	1380	140	91	14,4	-143	92,8	88	400,0	2519	40	374,8	5	120
19	1060	200	1380	140	110	14,4	-150	112,0	192	356,8	2552	-02	397,6	4	0
20	1060	300	1380	140	72	15,6	-84	80,0	153	056,8	1957	139	327,6	1	60
21	800	100	1380	140	48	8,4	-12	48,8	194	399,6	2376	194	237,6	1	40
22	800	150	1380	140	24	8,8	-95	50,4	181	391,6	3371	181	226,4	1	80
23	800	150	1380	140	36	8,8	-103	44,0	82	397,6	2549	82	300,4	1	120
24	800	150	1420	100	48	6,8	-82	45,2	174	398,8	2177	174	247,2	1	80
25	800	150	1410	140	48	6,8	-92	55,2	122	040,8	2066	112	281,6	1	80
26	800	150	1380	100	48	8,8	-98	51,6	91	398,0	2088	91	296,4	1	100
27	800	150	1380	180	48	8,8	-95	50,4	91	398,4	2089	91	296,0	1	100
28	800	150	1430	140	48	10,0	-98	51,6	112	398,0	2073	89	299,2	1	80
29	800	150	1430	180	48	10,0	-83	51,6	174	398,8	2102	108	284,4	1	80
30	800	150	1410	140	60	8,8	-103	44,0	84	027,6	1948	74	312,8	1	40
31	800	150	1380	140	72	8,8	-99	73,6	181	391,6	1995	30	361,6	1	120
32	800	200	1380	140	24	9,2	-90	53,6	222	225,6	3239	214	200,4	3	60
33	800	200	1380	140	36	9,2	-86	73,2	133	397,6	3293	133	260,0	1	60
34	800	200	1320	140	48	7,2	-96	52,8	156	046,8	1954	89	299,6	1	100
35	800	200	1380	100	48	9,2	-89	53,6	116	036,0	1948	99	291,2	1	80
36	800	200	1380	140	48	9,2	-83	53,6	194	399,6	2057	107	288,0	1	80
37	800	200	1380	180	48	9,2	-90	53,6	107	034,4	2002	99	292,0	1	100
38	800	200	1430	140	48	10,8	-96	52,8	116	036,0	2015	113	282,4	1	80
39	800	200	1410	140	60	9,2	-135	60,4	133	397,6	1810	32	357,2	5	60
40	800	200	1380	140	72	9,2	-86	73,2	222	225,6	1826	60	330,0	3	60
41	800	250	1380	140	48	9,2	-92	55,2	122	040,8	1886	96	297,6	1	80
42	800	300	1380	140	48	9,6	-83	53,6	156	046,8	2675	122	278,0	1	100

**Примітка:* 1-й стовпець (далі тільки номер) – номер варіанта; 2-й – діаметр ($D_{\text{відл}}$), мм; 3-й – товщина кокіля ($h_{\text{кок}}$), мм; 4-й – температура розливання металу ($t_{\text{розл}}$), °С; 5-й стовпець – вихідна температура кокіля ($t_{\text{кок}}$), °С; 6-й - час виїмки виливка з кокілю ($\tau_{\text{вийм}}$), год; 7-й – час кристалізації ($\tau_{\text{крисл}}$), год; 8-й - максимальне стискаюче напруження ($\sigma_{\text{макс.ст.}}$), МПа; 9-й - час, год відносно 8-го стовпця; 10-й - максимальне розтягуюче напруження ($\sigma_{\text{ост.раст.}}$), МПа; 11-й - час, год відносно 10-го стовпця; 12-й - напружений стан ($\sigma_{\text{макс.напр.}}$) на 400-й год (сума абсолютних величин напружень у всіх розрахункових точках поділу виливка), МПа; 13-й - розтягуюче напруження на 400-й год, МПа; 14-й - час, при якому деформація на зовнішньому шарі відрізняється від деформації на 400-й год (кінець розрахунку) $\leq 5\%$; 15-й - кількість змін знаку впродовж радіусу ($N_{\text{зм}}$); 16-й – товщина ($h_{\text{розт}}$) розтягнутого зовнішнього шару (входять розрахункові точки поділу радіусу, деформація розтягування у яких перевищує величину гранично пружної деформації), мм.

Для валків з $\varnothing 800$ мм параметр товщини кокілю виявився не значущим, а з $\varnothing 1600$ мм - малозначущим на рівень залишкових напружень, що виникають при кристалізації по перерізу виливка. Найбільший вплив на величину залишкового напруження мають час охолодження виливка, вихідна температура кокілю.

Температура розливання металу є значущим параметром для валків $\varnothing 1060$ мм і малозначущим для валків з меншим діаметром – 800 мм. Максимальні стискаючи напруження зовнішнього шару ($\sigma_{\text{макс.ст.}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{макс.ст.}} = 402,1 - 0,02h_{\text{кок}} + 0,05\tau_{\text{вийм}} - 0,21t_{\text{розл}} + 0,13t_{\text{кок}}, R=0,29 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$\sigma_{\text{макс.ст.}} = -28,2 - 0,08h_{\text{кок}} + 0,18\tau_{\text{вийм}} + 0,1t_{\text{розл}} - 0,04t_{\text{кок}}, R=0,28 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм}.$$

Вплив досліджених параметрів на $\sigma_{\text{макс.ст.}}$ залежить лише на 28-29% від дисперсійного розкиду властивостей. Можна припустити, що іншими факторами є напруження II роду та фазові перетворення, у тому числі формування залишкового аустеніту (його частки). Максимальні показники напруженого стану ($\sigma_{\text{макс.напр.}}$), МПа оцінювали за залежностями:

$$\sigma_{\text{макс.напр.}} = -1598,2 - 1,2h_{\text{кок}} - 27,1\tau_{\text{вийм}} + 4,4t_{\text{розл}} + 0,79t_{\text{кок}}, R=0,51 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$\sigma_{\text{макс.напр.}} = -1656 + 2,7h_{\text{кок}} - 32,6\tau_{\text{вийм}} + 3,2t_{\text{розл}} + 2,9t_{\text{кок}}, R=0,63 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм}.$$

Оцінка напруженого стану показала коефіцієнт кореляції значно нижчий 1.0, тому додатково розглянули низку чинників, що можуть впливати на знак і рівень напружень.

Число змін знаку вдовж радіуса ($N_{\text{зм}}$), разів:

$$N_{\text{зм}} = -21,42 - 0,0062h_{\text{кок}} + 0,024\tau_{\text{вийм}} + 0,018t_{\text{розл}}, R=0,40 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$N_{\text{зм}} = 23,05 + 0,0002h_{\text{кок}} + 0,017\tau_{\text{вийм}} - 0,014t_{\text{розл}} - 0,019t_{\text{кок}}, R=0,44 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм}.$$

Товщина розтягнутого шару ($h_{\text{розт}}$), мм:

$$h_{\text{розт}} = -15,29 + 0,02h_{\text{кок}} - 0,64\tau_{\text{вийм}} + 0,09t_{\text{розл}}, R=0,34 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$h_{\text{розт}} = 56,62 + 0,13h_{\text{кок}} - 0,023\tau_{\text{вийм}} - 0,023t_{\text{розл}} + 0,18t_{\text{кок}}, R=0,27 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм}.$$

Таблиця 4 - Результати розрахунку залишкових напружень (I роду)

r_i , мм ($\Delta r=19,61$)	Залишкові напруження σ_{oi} , МПа в момент часу τ , при $\Delta\tau=0,4\text{с}$					
	$\varnothing 1060\text{мм}$, варіант розрахунку №15				$\varnothing 800\text{мм}$, варіант розрахунку №38	
	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_1	τ_2
1	2	3	4	5	6	7
19,61	23,00	22,60	11,30	11,00	21,8	-35,7
39,22	23,10	22,70	11,40	11,10	21,9	-37,2
58,83	23,70	23,30	12,00	11,70	23,1	-6,2
78,44	6,10	-1,30	4,40	-3,00	-1,5	-73,9
98,05	-41,40	-35,30	-41,80	-35,10	-35,9	-84,3
117,66	-67,10	-72,30	-65,20	-62,90	-74,3	-119,8

Продовження таблиці 4

137,27	-92,20	-91,90	-89,10	-91,10	-86,5	-170,7
156,88	-107,70	-111,30	-106,00	-104,10	-100,9	-156
176,49	-122,10	-117,90	-122,30	-119,70	-113	-120,3
196,10	-134,40	-136,00	-130,30	-131,60	-108,5	-101,2
215,71	-133,00	-131,00	-130,80	-130,50	-76,3	-111,1
235,32	-128,20	-121,30	-122,10	-126,00	-66,5	-97,8
254,93	-100,80	-97,30	-98,30	-100,70	-48,8	-83,5
274,54	-84,00	-85,70	-82,60	-82,50	-37,8	-83,4
294,15	-72,50	-75,80	-66,90	-70,20	-14,4	-1,4
313,76	-59,30	-55,50	-66,10	-58,50	-1,8	182,5
333,37	-42,70	-47,00	-46,60	-46,40	15,3	-75,4
352,98	-33,50	-34,80	-39,80	-31,10	42,2	61,9
372,59	-22,10	-18,20	-24,00	-23,30	65,4	87,8
392,20	-6,70	-8,40	-7,90	-9,00	87,3	111,7
411,81	12,00	6,00	12,00	10,30	119,3	140,1
431,42	28,40	27,90	26,70	29,70		
451,03	49,40	49,40	48,20	47,30		
470,64	67,50	69,00	70,60	67,20		
490,25	91,10	92,70	92,10	92,70		
509,86	115,30	116,10	116,00	113,20		
529,46	143,30	143,10	143,70	143,90		

Для визначення впливу швидкості кристалізації металу на однорідність його структури у робочому шарі провели теоретичні дослідження щодо зміни швидкості кристалізації шляхом математичної оцінки впливу на неї різних параметрів (табл. 5). В результаті було отримано лінійне рівняння:

Час кристалізації ($\tau_{\text{крис.}}$): $\tau_{\text{крис.}} = -50,297 + 0,019D_{\text{відл}} + 0,0068h_{\text{н}} + 0,0071h_{\text{кок}} - 0,007\tau_{\text{вийм}} + 0,0031t_{\text{розл}} + 0,00074t_{\text{кок}}, R=0,99$

Таблиця 5 - Тривалість охолодження виливки з моменту заливки

Характеристика завдання і значення параметра, що варіюється	Діаметр валка, мм та тривалість охолодження виливка з моменту заливки, год.	
	800	1060
Вплив товщини кокілю ($h_{\text{кок}}$)		
Товщина кокіля: 100 мм	48,5	14
150 мм	-	-
200 мм	12,5	10

Продовження таблиці 5

250 мм	-	7,5
300 мм	7,5	25
Вплив товщини намазки (h_n)		
Товщина намазки: 4 мм	-	15,0
5 мм	-	10
6 мм	-	12,2
10 мм	-	13
15 мм	-	14
20 мм	-	14,5
Вплив вихідної температури форми		
100°C	-	10,0
120°C	-	12,0
150°C	-	13,0
180°C	-	14
Вплив температури заливки		
1380°C	-	12,5
1400°C	-	4
1420°C	-	13
1430°C	-	14

З отриманих залежностей випливає, що кристалізація в цілому при використанні кокілю товщиною 300 мм йде повільніше, хоча в приграничних областях у вихідний період прискорюється кристалізація. Швидкість кристалізації визначає спрямованість зростання кристалів і частку, і навіть розмір зерен карбідної фази. Встановлено, що найбільший вплив мають товщина кокіля ($h_{\text{кок}} = 100-300\text{мм}$), товщина намазки покриття ($h_n = 4-20\text{мм}$) та час охолодження виливка (досліджений інтервал $\tau_{\text{вийм}} = 24-110$ год). Значення, за яких швидкість кристалізації виливка максимальна: для валків $\varnothing 800\text{мм}$ ($\tau_{\text{крист.}} = 6,8$ год) - $t_{\text{розл}} = 1410^\circ\text{C}$; $h_{\text{кок}} = 150\text{мм}$; $h_n = 6,2\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}} = 48$ год; $\varnothing 1060\text{мм}$ ($\tau_{\text{крист.}} = 10,4$ год) - $t_{\text{розл}} = 1430^\circ\text{C}$; $h_{\text{кок}} = 100\text{мм}$; $h_n = 4,5\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}} = 72$ год. Тобто зміною товщини кокілю та шару теплоізоляційного покриття (намазки) форми, а також часом охолодження виливка можна суттєво регулювати швидкість кристалізації. З проведеного аналізу видно, що температура кокілю перед розливом металу (інтервал нагріву $t_{\text{кок}} = 100-180^\circ\text{C}$), практично не впливає на умови кристалізації валків.

На рис. 4 наведено залежності зміни температури від часу кристалізації на перерізі валка $\varnothing 1060$ мм та кокіля. Довжина вдовж горизонталі відповідає радіусу валка (до вертикальної лінії, а після неї – товщині кокіля).

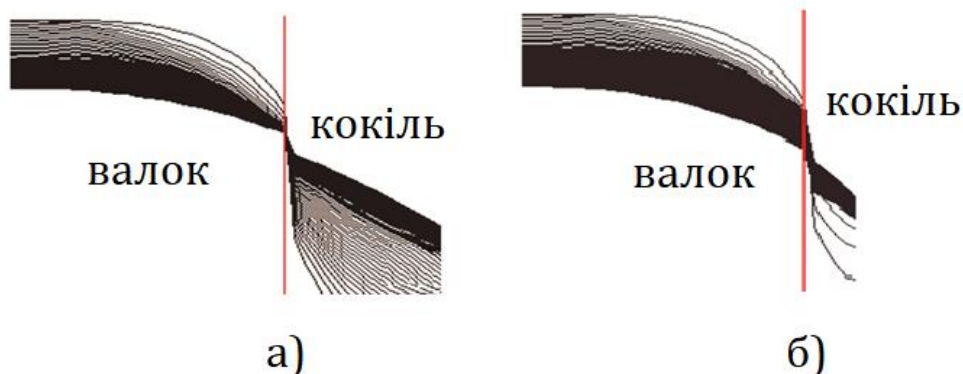


Рисунок 4 - Залежність зміни температури від часу кристалізації по перерізу валка $\varnothing 1060$ мм та кокілю товщиною: а) 300 мм; б) 100 мм

Графіки побудовано за точками через 0,025 год. тому лінії зливаються, утворюючи чорні ділянки. Вертикальна лінія на графіках характеризує межу валок-кокіль і відрізняється стрибком температур з-поміж них, тобто у цьому місці стику видно розрив у температурах між ними за рівності теплових потоків. Без урахування стику температура поверхні кокілю підвищується на 10-20%. З наведених даних випливає, що кристалізація загалом для кокілю товщиною 300 мм йде повільніше, хоча у приграничних областях у вихідний період прискорюється кристалізація. Для прогнозування впливу досліджуваних параметрів при кристалізації на НДС прокатних валків різного діаметра було проведено теоретичний аналіз з урахуванням діаметра. В результаті аналізу були отримані лінійні рівняння.

Максимальне напруження розтягування зовнішнього шару ($\sigma_{\text{ост.розт.макс}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{ост.розт.макс}} = 13,1 + 0,13D_{\text{відл}} + 0,31h_{\text{кок}} - 2,1\tau_{\text{вийм}} + 0,02t_{\text{розл}} + 0,1t_{\text{кок}}, R=0,86,$$

де $D_{\text{відл}}$ – діаметр вилівка, мм.

Тривалість дії max напруження розтягнення зовнішнього шару ($\tau_{\text{макс.розт.}}$), год:

$$\tau_{\text{макс.розт.}} = -79,66 - 0,060D_{\text{відл}} + 0,419h_{\text{кок}} - 4,53\tau_{\text{вийм}} + 0,301t_{\text{розл}} + 0,77t_{\text{кок}}, R=0,77$$

Максимальне стискаюче напруження зовнішнього шару ($\sigma_{\text{макс.ст.}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{макс.ст.}} = 85,7 + 0,12D_{\text{відл}} - 0,32h_{\text{кок}} + 1,1\tau_{\text{вийм}} - 0,04t_{\text{розл}} + 0,07t_{\text{кок}}, R=0,72$$

Тривалість дії тах стискаючого напруження зовнішнього шару ($\tau_{\text{макс.ст.}}$), год:

$$\tau_{\text{макс.ст.}} = -14,51 + 0,043D_{\text{відл}} + 0,026h_{\text{кок}} + 0,675\tau_{\text{вийм}} - 0,003t_{\text{розл}} + 0,013t_{\text{кок}}, R=0,99$$

Максимальний показник напруженого стану ($\sigma_{\text{макс.напр.}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{макс.напр.}} = -2511,4 + 3,5D_{\text{відл}} - 0,6h_{\text{кок}} - 29,1\tau_{\text{вийм}} - 0,24t_{\text{розл}} + 0,9t_{\text{кок}}, R=0,56$$

Число змін знаку вдовж радіусу ($N_{\text{зм}}$), разів:

$$N_{\text{зм}} = 20,77 - 0,006D_{\text{відл}} - 0,014h_{\text{кок}} + 0,099\tau_{\text{вийм}} - 0,010t_{\text{розл}} + 0,004t_{\text{кок}}, R=0,71$$

Товщина розтягнутого шару ($h_{\text{розт}}$), мм:

$$h_{\text{розт}} = -9,953 + 0,013D_{\text{відл}} + 0,0462h_{\text{кок}} - 0,363\tau_{\text{вийм}} + 0,021t_{\text{розл}} - 0,029t_{\text{кок}}, R=0,48$$

Показник напруженого стану має корелювати із твердістю валка. При цьому чим товщим є кокіль, тим більше напруження. Час вилучення виливка з кокілю, а також температура перегріву металу та розливу сильно впливають на його напружений стан і ці фактори сумарно підвищують рівень НДС ~ на 33%.

На рис. 5 наведено залежності зміни температури від часу кристалізації для валків Ø1060, відлитих у кокіль товщиною 100 та 300 мм. Аналізували зміни температури від часу (у період до 40 год) у чотирьох точках. Горизонтальні лінії на графіках відповідають: верхня температура ліквідусу, нижня – температура солідуса.

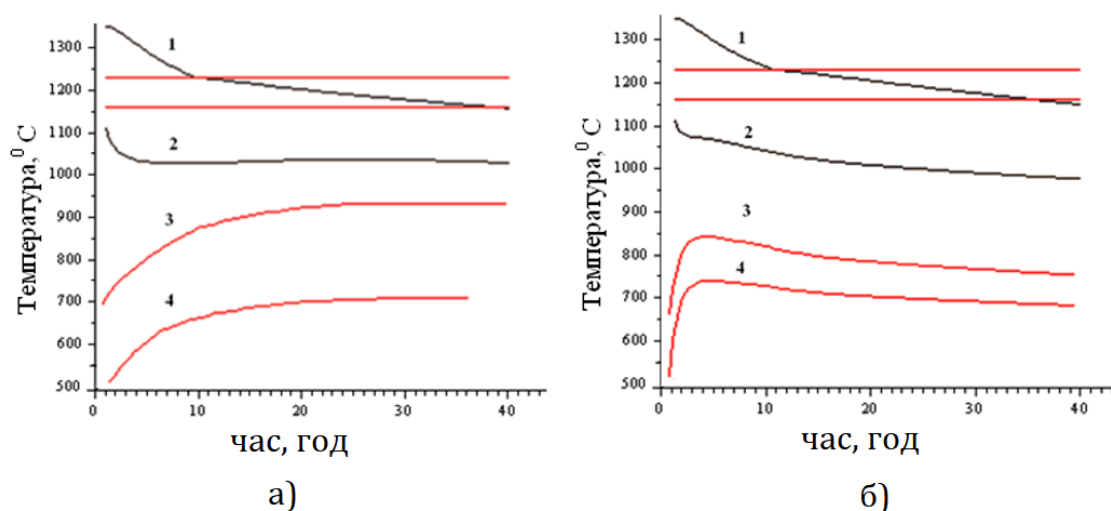


Рисунок 5 - Залежність температури від часу кристалізації валка Ø1060 мм у кокілі завтовшки: а – 300 мм; б – 100 мм. Зміни температури від часу: 1 - в центрі виливка; 2 – в відливці на стику з кокілем; 3 – в кокілі на стику з виливком; 4 – кокілю на зовнішній стороні

Виконані розрахунки показали, що при охолодженні зовнішні шари, що мають нижчу температуру, швидше зазнають розтягуючих напружень. Так, для виливків Ø800 мм max розтягуючі напруження виникають на 3/4 радіусу, а для валків Ø1060 мм - на поверхні. При цьому зі збільшенням діаметра вилівка показник НДС зі збільшенням часу знижується (відбувається відпал). Схеми формування напружень через нерівномірність температурних полів по перерізу валка для досліджених варіантів (див. табл. 3) наведена на рис.6. По осі абсцис відкладено тривалість процесу, год; ординат – температура, °С. На графіки температур накладено графік зеленого кольору – сформоване напруження у зовнішньому шарі з позначенням залишкового напруження. Для всіх графіків інтервал зміни напружень знаходиться в межах від -240...+240 МПа. Горизонтальна зелена лінія - нульове напруження.

На всіх графіках межі кокіль-вилівок чітко видно майданчик, що відповідає фазовим перетворенням. Для зовнішнього шару цей майданчик теж видно, але нахил його більший, ніж в центрі. Дві горизонтальні червоні лінії, відповідають температурі солідуса та ліквідуса. Значення температур наведені у табл.6 та 7.

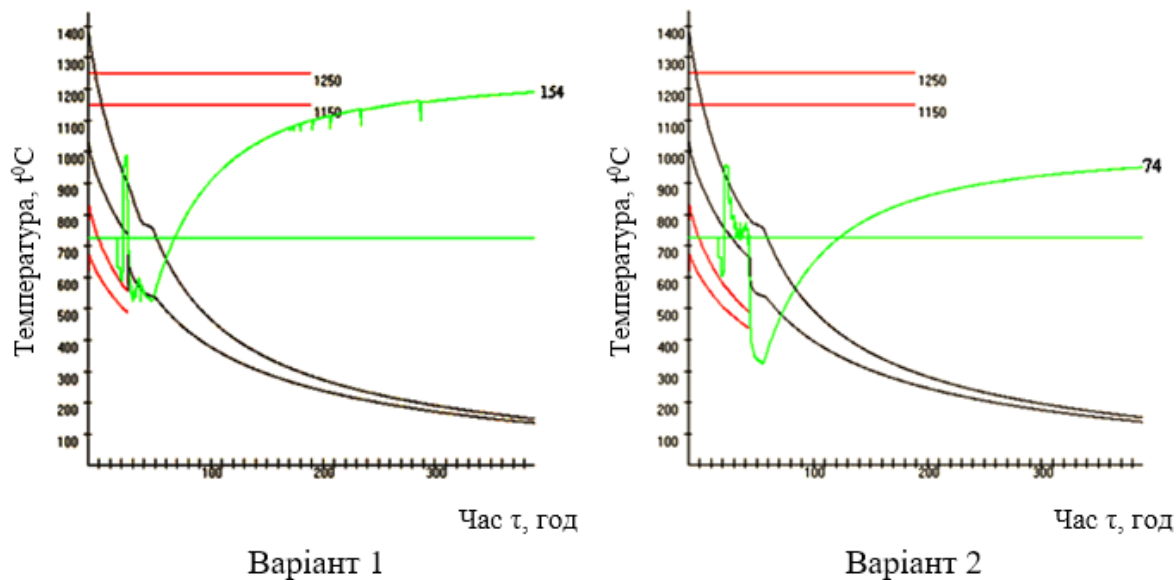
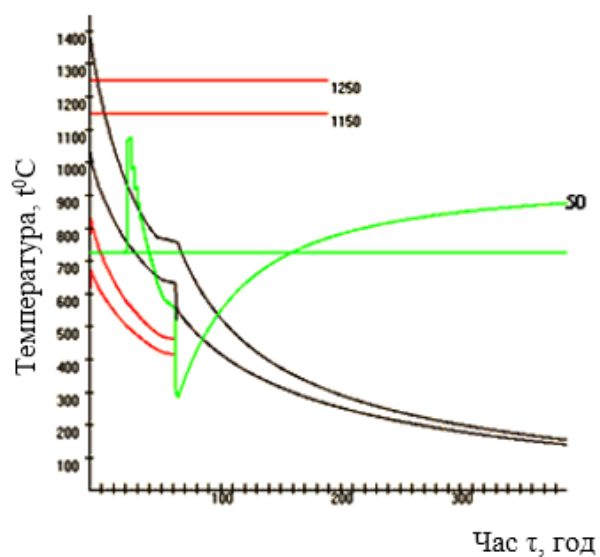
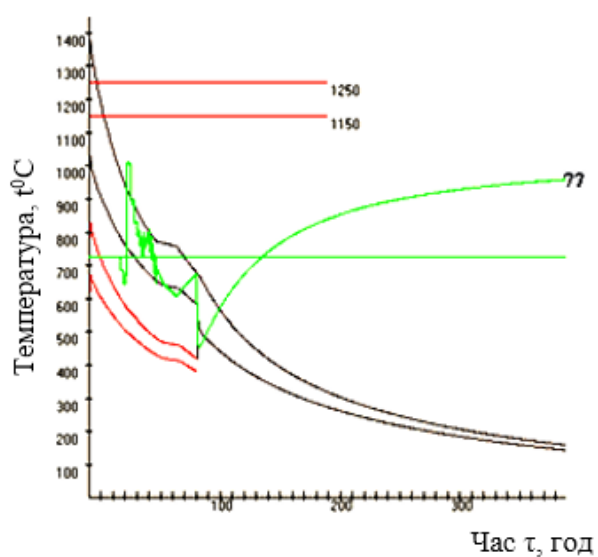


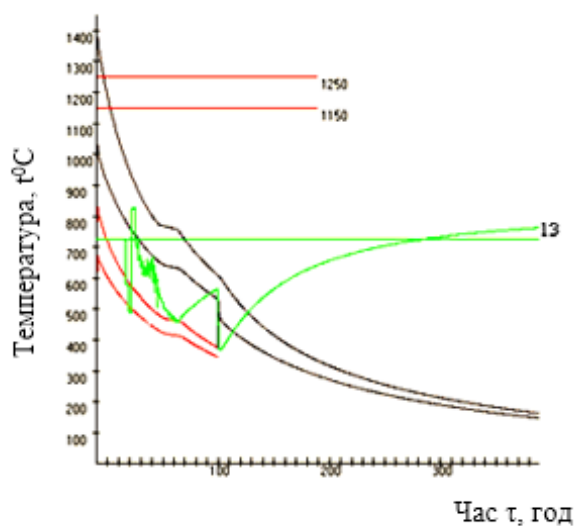
Рисунок 6 - Розрахункові залежності для досліджених варіантів кристалізації виливків відповідно даних табл.3



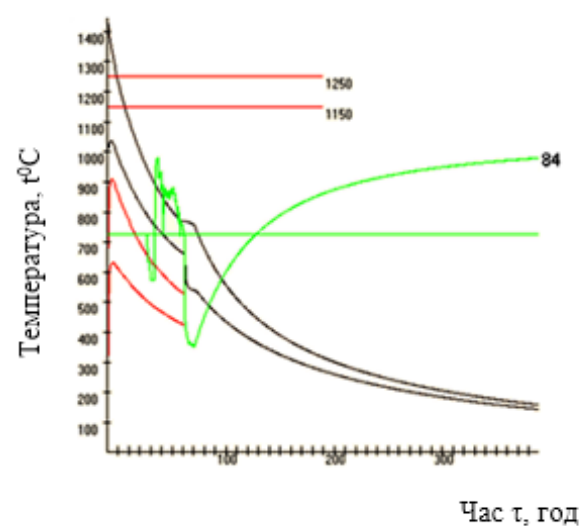
Варіант 5



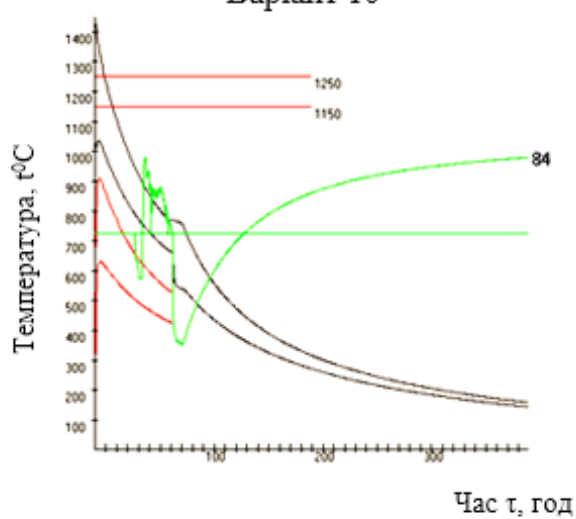
Варіант 9



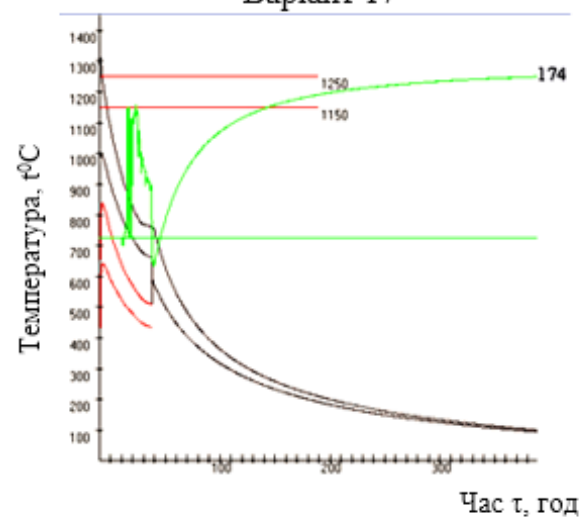
Варіант 10



Варіант 17

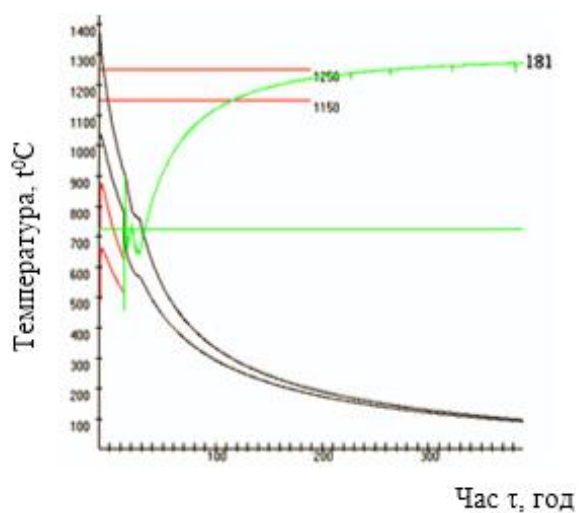


Варіант 20

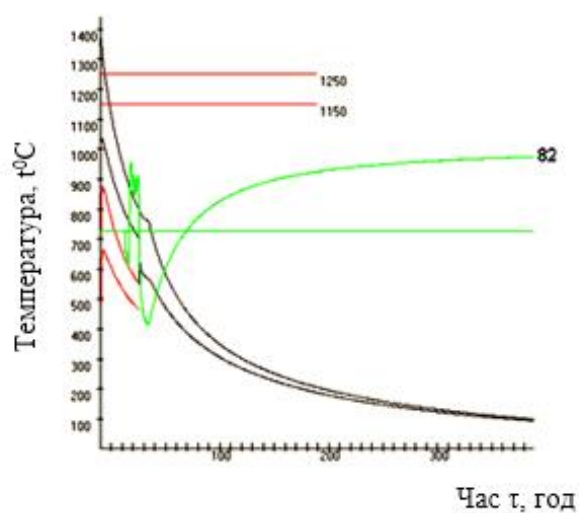


Варіант 21

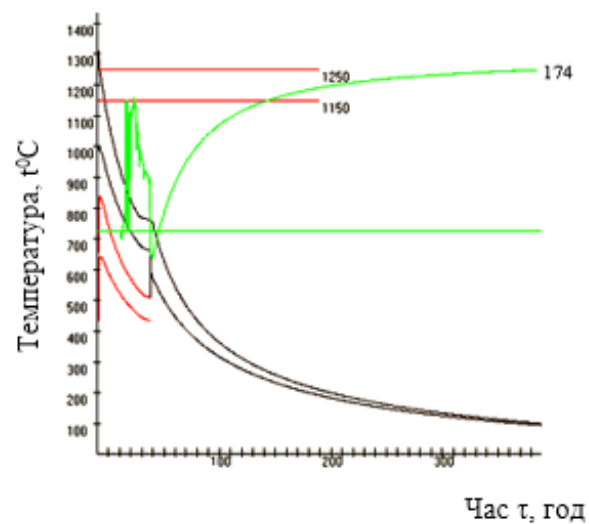
Продовження рис. 6



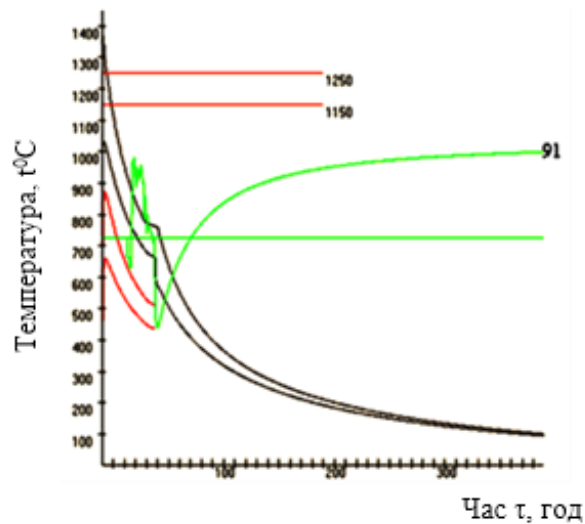
Варіант 22



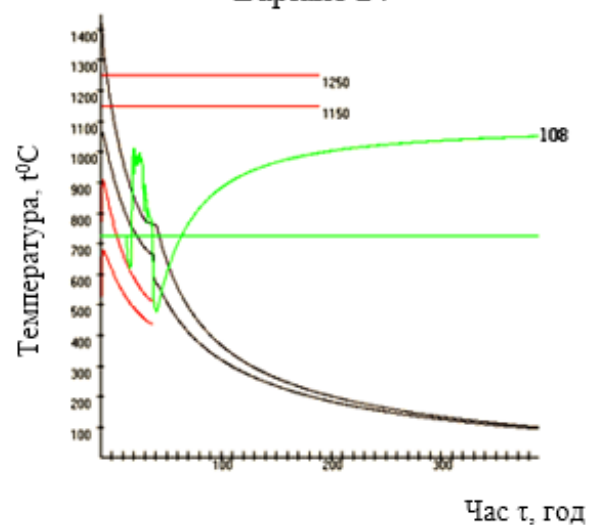
Варіант 23



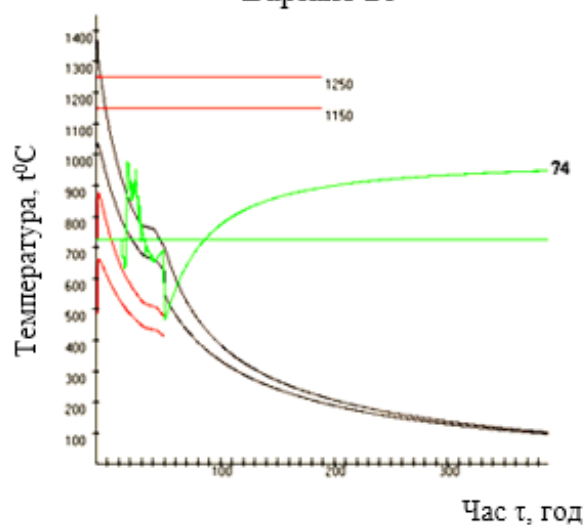
Варіант 24



Варіант 26

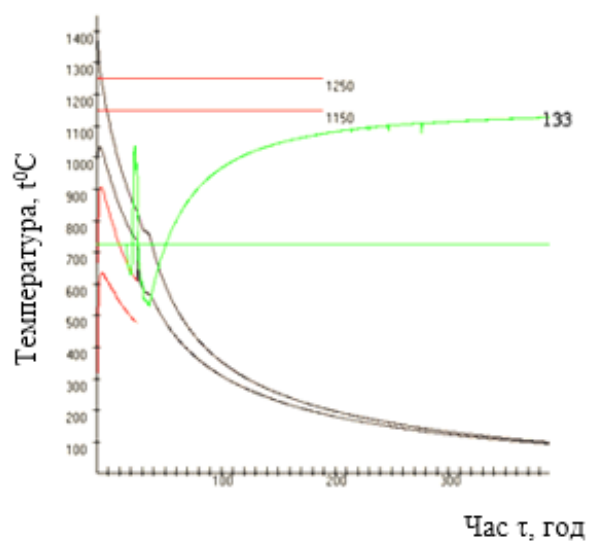


Варіант 29

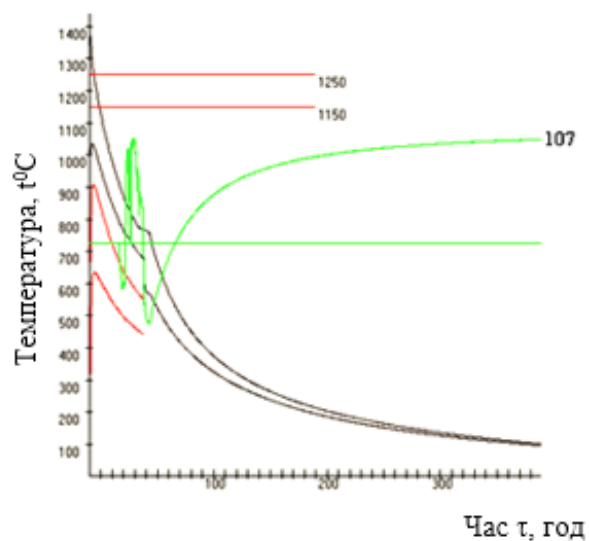


Варіант 30

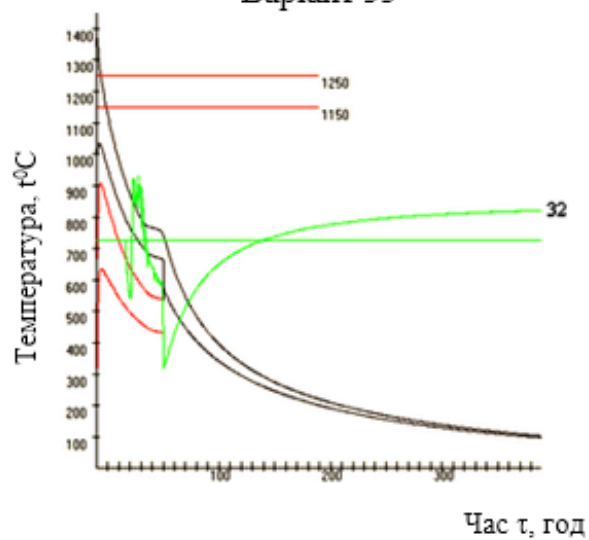
Продовження рис. 6



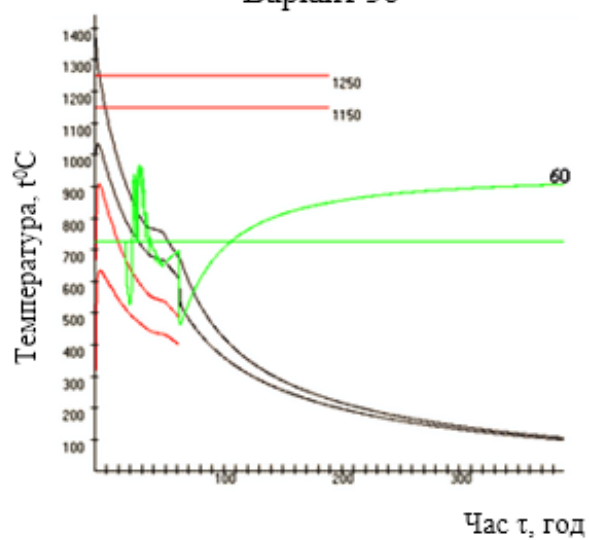
Варіант 33



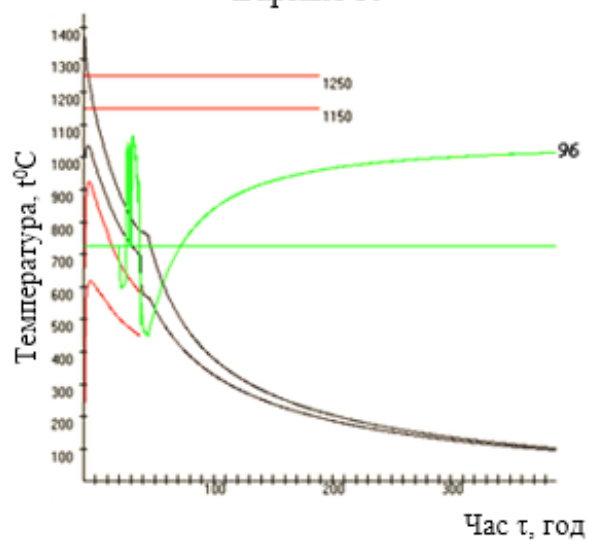
Варіант 36



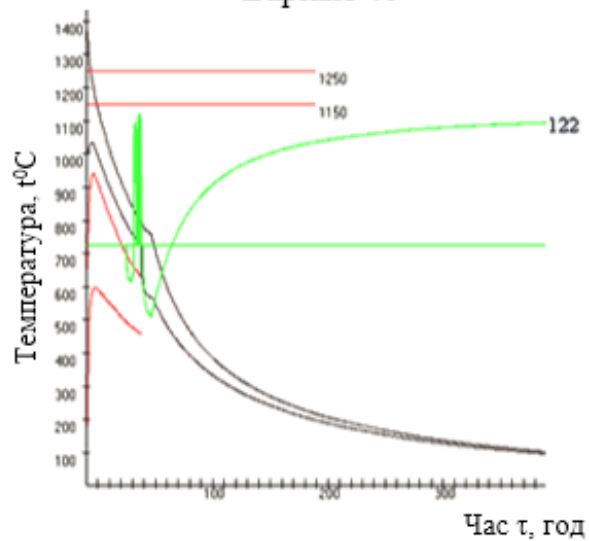
Варіант 39



Варіант 40



Варіант 41



Варіант 42

Продовження рис. 6

Таблиця 6 – Вимірювання температури по перерізу валка, °C

Час, год	Відстань від центра до поверхні валка, мм								
	19,6	39,2	58,8	78,4	98	117,6	137,2	156,8	176,4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	1193,7	1193,6	1193,2	1192,3	1190,8	1188,7	1185,8	1182,3	1178,0
16	1095,6	1095,5	1095,2	1094,4	1093,2	1091,4	1089,0	1086,0	1082,3
24	1014,2	1014,2	1013,9	1013,2	1012,1	1010,5	1008,4	1005,8	1002,6
32	945,7	945,7	945,4	944,8	943,8	942,4	940,6	938,3	935,5
40	887,2	887,2	887,0	886,5	885,6	884,4	882,8	880,8	878,3
48	838,7	838,6	838,5	838,0	837,3	836,3	834,9	833,2	831,1
56	798,4	798,4	798,2	797,9	797,3	796,4	795,3	793,9	792,2
64	770,3	770,3	770,3	770,1	770,0	769,6	769,0	768,1	766,8
72	765,4	765,4	765,2	764,7	763,9	762,8	761,3	759,3	757,0
80	758,8	758,8	758,5	758,0	757,0	755,6	753,9	751,9	749,5
88	730,3	730,3	730,2	729,8	729,2	728,3	727,2	725,8	724,0
96	685,0	684,9	684,7	684,0	682,9	681,4	679,3	676,7	673,6
104	629,0	629,0	628,7	628,2	627,2	625,9	624,1	621,8	619,1
112	582,1	582,1	581,9	581,4	580,6	579,4	577,8	575,9	573,5
120	542,2	542,2	542,0	541,6	540,8	539,8	538,4	536,7	534,6
128	507,8	507,8	507,6	507,2	506,6	505,6	504,4	502,9	501,0
136	477,7	477,7	477,6	477,2	476,6	475,8	474,7	473,4	471,7
144	451,2	451,2	451,1	450,8	450,2	449,5	448,5	447,3	445,8
152	427,7	427,6	427,5	427,2	426,8	426,1	425,2	424,1	422,7
160	406,5	406,5	406,4	406,1	405,7	405,1	404,3	403,3	402,0
168	387,5	387,5	387,4	387,1	386,7	386,2	385,4	384,5	383,3
176	370,2	370,1	370,0	369,8	369,5	368,9	368,2	367,4	366,3
184	354,4	354,3	354,3	354,1	353,7	353,2	352,6	351,8	350,8
192	339,9	339,9	339,8	339,6	339,3	338,8	338,2	337,5	336,6
200	326,5	326,5	326,4	326,3	326,0	325,5	325,0	324,3	323,4
208	314,2	314,2	314,1	313,9	313,7	313,3	312,7	312,1	311,3
216	302,7	302,7	302,6	302,5	302,2	301,9	301,4	300,8	300,0
224	292,1	292,0	292,0	291,8	291,6	291,2	290,8	290,2	289,5
232	282,1	282,1	282,0	281,9	281,7	281,3	280,9	280,4	279,7
240	272,8	272,8	272,7	272,6	272,4	272,1	271,6	271,1	270,5
248	264,0	264,0	264,0	263,8	263,6	263,3	263,0	262,5	261,9
256	255,8	255,8	255,7	255,6	255,4	255,1	254,8	254,3	253,8

Продовження табл.6

Час, год	Відстань від центра до поверхні валка, мм								
	196	215,6	235,2	254,8	274,4	294	313,6	333,2	352,8
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8	1172,9	1167,0	1160,3	1152,8	1144,4	1135,1	1125,0	1114,1	1102,2
16	1078,0	1073,0	1067,4	1061,0	1053,9	1046,1	1037,5	1028,2	1018,1
24	998,8	994,5	989,5	983,9	977,7	970,8	963,3	955,2	946,3
32	932,2	928,3	924,0	919,1	913,6	907,6	901,0	893,8	886,1
40	875,4	872,1	868,3	864,0	859,3	854,0	848,3	842,1	835,3
48	828,6	825,8	822,5	818,9	814,8	810,3	805,5	800,2	794,4
56	790,1	787,8	785,1	782,1	778,8	775,1	771,1	766,8	761,6
64	765,1	762,9	760,1	756,8	752,8	748,4	743,6	738,5	733,0
72	754,2	751,1	747,7	743,9	739,7	735,2	730,4	725,2	719,6
80	746,8	743,8	740,4	736,6	732,5	728,1	723,4	718,2	712,8
88	722,0	719,6	716,9	713,9	710,5	706,8	702,8	698,3	693,6
96	669,9	665,6	660,7	655,2	649,1	642,4	635,0	627,0	618,3
104	615,9	612,2	608,0	603,2	597,9	592,1	585,7	578,8	571,3
112	570,7	567,5	563,8	559,7	555,1	550,0	544,4	538,4	531,9
120	532,2	529,3	526,1	522,4	518,4	513,9	509,0	503,7	498,0
128	498,9	496,3	493,5	490,2	486,6	482,7	478,3	473,6	468,5
136	469,7	467,5	464,9	462,0	458,8	455,2	451,3	447,1	442,5
144	444,0	442,0	439,6	437,0	434,1	430,9	427,4	423,6	419,4
152	421,1	419,3	417,1	414,8	412,1	409,2	406,0	402,5	398,8
160	400,5	398,9	396,9	394,7	392,3	389,7	386,7	383,6	380,1
168	382,0	380,4	378,6	376,6	374,4	372,0	369,3	366,4	363,2
176	365,1	363,6	362,0	360,2	358,1	355,9	353,4	350,7	347,8
184	349,7	348,3	346,8	345,1	343,2	341,1	338,8	336,3	333,6
192	335,5	334,3	332,9	331,3	329,5	327,6	325,4	323,1	320,6
200	322,4	321,3	320,0	318,5	316,9	315,0	313,1	310,9	308,6
208	310,4	309,3	308,1	306,7	305,1	303,4	301,6	299,6	297,4
216	299,1	298,1	297,0	295,7	294,2	292,6	290,9	289,0	287,0
224	288,7	287,7	286,7	285,4	284,1	282,6	280,9	279,2	277,2
232	278,9	278,0	277,0	275,9	274,6	273,2	271,6	269,9	268,1
240	269,8	268,9	268,0	266,9	265,7	264,3	262,9	261,3	259,6
248	261,2	260,4	259,5	258,4	257,3	256,0	254,6	253,1	251,5
256	253,1	252,3	251,5	250,5	249,4	248,2	246,9	245,5	243,9
264	245,5	244,7	243,9	243,0	242,0	240,8	239,6	238,2	236,8

Продовження табл.6

Час, год	Відстань від центра до поверхні валка, мм								
	372,4	392	411,6	431,2	450,8	470,4	490	509,6	530
1	20	21	22	23	24	25	26	27	28
8	1089,5	1075,8	1061,3	1045,8	1029,5	1012,2	994,1	975,0	955,0
16	1007,3	995,6	983,2	970,0	956,0	941,2	925,7	909,3	892,1
24	936,8	926,7	915,8	904,3	892,1	879,2	865,6	851,3	836,3
32	877,7	868,8	859,3	849,1	838,4	827,1	815,1	802,6	789,4
40	828,1	820,4	812,1	803,3	794,1	784,3	773,9	763,1	751,3
48	788,3	781,7	774,7	767,2	758,8	749,6	739,8	729,6	718,9
56	755,4	748,8	741,7	734,2	726,2	717,7	708,8	699,5	689,8
64	727,1	720,8	714,2	707,1	699,7	691,8	683,6	674,9	665,9
72	713,7	707,5	700,8	693,9	686,5	678,9	670,8	662,4	653,6
80	707,0	700,8	694,3	687,4	680,2	672,7	664,8	656,5	647,9
88	688,4	682,9	677,1	670,8	664,2	657,2	649,9	642,2	634,1
96	609,0	599,0	588,3	577,0	565,0	552,3	538,9	524,8	510,1
104	563,3	554,6	545,5	535,7	525,4	514,5	503,0	490,9	478,3
112	524,9	517,4	509,4	500,9	491,9	482,4	472,4	461,9	450,9
120	491,8	485,2	478,2	470,7	462,8	454,4	445,6	436,3	426,6
128	463,0	457,1	450,9	444,2	437,2	429,7	421,9	413,6	405,0
136	437,6	432,3	426,7	420,7	414,4	407,7	400,7	393,3	385,6
144	415,0	410,2	405,2	399,8	394,1	388,0	381,7	375,0	368,0
152	394,7	390,4	385,8	380,9	375,7	370,2	364,5	358,4	352,0
160	376,5	372,5	368,3	363,8	359,1	354,1	348,8	343,2	337,4
168	359,8	356,2	352,3	348,2	343,9	339,3	334,4	329,3	324,0
176	344,7	341,3	337,8	334,0	329,9	325,7	321,2	316,5	311,6
184	330,8	327,7	324,3	320,8	317,1	313,2	309,0	304,6	300,1
192	317,9	315,0	312,0	308,7	305,2	301,6	297,7	293,6	289,4
200	306,1	303,4	300,5	297,4	294,2	290,8	287,2	283,4	279,4
208	295,0	292,5	289,8	287,0	283,9	280,7	277,4	273,8	270,1
216	284,8	282,4	279,9	277,2	274,4	271,3	268,2	264,9	261,4
224	275,2	272,9	270,6	268,0	265,4	262,5	259,6	256,4	253,2
232	266,2	264,1	261,8	259,5	256,9	254,3	251,5	248,5	245,4
240	257,7	255,7	253,6	251,4	249,0	246,5	243,8	241,0	238,1
248	249,8	247,9	245,9	243,8	241,5	239,1	236,6	234,0	231,2
256	242,3	240,5	238,6	236,6	234,4	232,2	229,8	227,3	224,7
264	235,2	233,5	231,7	229,8	227,7	225,6	223,3	220,9	218,4

Продовження табл.6

1	20	21	22	23	24	25	26	27	28
272	228,5	226,8	225,1	223,3	221,4	219,3	217,2	214,9	212,5
280	222,1	220,5	218,9	217,2	215,3	213,4	211,3	209,2	206,9
288	216,0	214,6	213,0	211,3	209,6	207,7	205,8	203,7	201,5
296	210,3	208,9	207,4	205,8	204,1	202,3	200,4	198,5	196,4
304	204,8	203,4	202,0	200,5	198,9	197,2	195,4	193,5	191,5
312	199,5	198,2	196,9	195,4	193,9	192,2	190,5	188,7	186,8
320	194,5	193,3	192,0	190,6	189,1	187,5	185,9	184,1	182,3
328	189,7	188,5	187,3	185,9	184,5	183,0	181,4	179,7	178,0
336	185,1	184,0	182,8	181,5	180,1	178,7	177,1	175,5	173,9
344	180,7	179,6	178,4	177,2	175,9	174,5	173,0	171,5	169,9
352	176,5	175,4	174,3	173,1	171,8	170,5	169,1	167,6	166,0
360	172,4	171,4	170,3	169,2	167,9	166,7	165,3	163,9	162,4
368	168,5	167,5	166,5	165,4	164,2	163,0	161,6	160,3	158,8
376	164,7	163,8	162,8	161,7	160,6	159,4	158,1	156,8	155,4
384	161,1	160,2	159,2	158,2	157,1	155,9	154,7	153,4	152,1
392	157,6	156,8	155,8	154,8	153,7	152,6	151,4	150,2	148,9
400	154,3	153,4	152,5	151,5	150,5	149,4	148,3	147,1	145,8

Примітка. Розраховані дані для варіанта №15 з табл. 2.

Таблиця 7 - Зміна температури по перерізу в системі валок-виливниця, °С

Час, ч	Расстояние от центра валка до поверхности изложницы, мм								
	14,9	29,8	44,7	59,6	74,5	89,4	104,3	119,2	134,1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	1193,7	1193,6	1193,2	1192,3	1190,8	1188,7	1185,8	1182,3	1178,0
16	1095,6	1095,5	1095,2	1094,4	1093,2	1091,4	1089,0	1086,0	1082,3
24	1014,2	1014,2	1013,9	1013,2	1012,1	1010,5	1008,4	1005,8	1002,6
32	945,7	945,7	945,4	944,8	943,8	942,4	940,6	938,3	935,5
40	887,2	887,2	887,0	886,5	885,6	884,4	882,8	880,8	878,3
48	838,7	838,6	838,5	838,0	837,3	836,3	834,9	833,2	831,1
56	798,4	798,4	798,2	797,9	797,3	796,4	795,3	793,9	792,2
64	770,3	770,3	770,3	770,1	770,0	769,6	769,0	768,1	766,8
72	765,4	765,4	765,2	764,7	763,9	762,8	761,3	759,3	757,0
80	758,8	758,8	758,5	758,0	757,0	755,6	753,9	751,9	749,5
88	730,3	730,3	730,2	729,8	729,2	728,3	727,2	725,8	724,0

Примітка. Розраховані дані для варіанта №18 з табл. 2.

При аналізі математичної моделі НДС встановлено, що зі збільшенням діаметра вилівка максимальне розтягувальне напруження мають менші за розміром. При охолодженні валка Ø800 мм протягом 80 год (за прийнятою

технологією 72 год) в центрі валка температура досягає 400°C. При 400°C у валка Ø800 мм розтягувальні напруження становлять 200МПа і зона їх за обсягом істотна. При цьому в процесі їх охолодження у формі напруження змінюють свій знак. Розрахунковим методом встановлено, що для виливків Ø1060 мм і, в деяких випадках, для Ø800 мм напруження двічі змінюють свій знак, що добре видно за п'ятим варіантом (табл.3): стискаюче - 146 МПа відповідає 74,4 год, а розтягуюче 116 МПа - 35,2 год, наприкінці розтягуюче напруження досягає 50МПа. Тобто спочатку йде розтягування до 116 МПа, потім стискання до -146МПа, яке доходить до 50 МПа. Для Ø800 мм отримано 4 варіанти з напруженням розтягування, що наближається до 200МПа (21, 22, 24 та 32-варіанти), а для Ø1060мм лише один такий варіант (№11). Зменшення товщини кокіля не збільшує кількість таких варіантів. Великі розтягуючі напруження спостерігаються при охолодженні вилівка у формі ≤ 48 год. Аналізуючи отримані результати встановлено, що висока швидкість охолодження вилівка (№№1, 11, 22, 32, 33) призводить до великих напружень, обумовлених значним температурним градієнтом за перерізом валка. Виконано аналіз числа змін знаків напружень (Nз) за перерізом листопрокатних валків. Для валків з Ø800мм – 3 зміни знаку за температури кокілю 140°C; Ø1060 мм - майже всі варіанти кристалізуються зі зміною знаку напруження, виключаючи №№ 1,14 і 19. Виникнення напружень різного знаку за перерізом вилівка при кристалізації може негативно впливати при експлуатації валка. Це потрібно враховувати при призначенні параметрів термообробки.

За результатами моделювання можна відзначити наступне. Виявлено чинники, що сприяють формуванню напружено деформованого стану в масивних виливках прокатних валків. Основною причиною виникнення залишкових напружень є неоднорідність деформованого стану, що пов'язана зі змінним перебігом кристалізації за часом різних зон валка. Встановлено значущі чинники, що є причиною появи цієї неоднорідності: температурний градієнт; напруження II роду; фазові перетворення, зокрема формування залишкового аустеніту.

Оскільки експериментальні методи визначення НДС в тілі масивних виливків при кристалізації чавуну утруднені через складність та дорожнечу проведення експериментів, була розроблена математична модель термомеханічних процесів, що відбуваються при кристалізації, що включає розрахунок температурного та напружено-деформованого станів.

Виконано теоретичні дослідження щодо впливу товщини кокілю, товщини шару теплоізоляційного покриття форми, її температури перед розливом і металу, що розливається, у форму на швидкість кристалізації. Встановлено, що найбільше впливають вихідна температура розливу (досліджували інтервали $t_{\text{розл}}=1320-1430^{\circ}\text{C}$), час охолодження вилівка ($\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год.), товщина кокілю (100-300мм), товщина шару теплоізоляційного покриття форми (4-20мм). Значеннями, при яких швидкість кристалізації вилівка є максимальною, для валків Ø800мм ($\tau_{\text{крист.}}=6,8$ год.) - $t_{\text{розл}}=1410^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=150$ мм; $h_{\text{н}}=6,2$ мм; $\tau_{\text{вийм}}=48$ год.; Ø1060мм ($\tau_{\text{крист.}}=10,4$ год.) - $t_{\text{розл}}=1430^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=100$ мм; $h_{\text{н}}=4,5$ мм; $\tau_{\text{вийм}}=72$ год. Таким чином, зі зміною температури розливу металу, товщини кокіля, шару теплоізоляційного покриття форми і часу охолодження вилівки можна істотно регулювати швидкість кристалізації. З проведеного аналізу видно, що температура кокілю перед розливом металу (інтервал нагріву $t_{\text{кок}}=100-180^{\circ}\text{C}$) практично не впливає на умови кристалізації. Проте, в результаті проведеного аналізу встановлено, що висока швидкість охолодження вилівка призводить до виникнення великих напружень обумовлених значними температурними градієнтами перерізу валка.

На підставі 42 варіантів розрахунків за рішенням одномірної задачі при охолодженні виливків встановлено, що для валків Ø800 мм максимальні розтягуючі напруження виникають на 3/4 радіусу, а для валків Ø1060 мм - на поверхні. Отримано рівняння лінійної залежності для прогнозу утворення максимального рівня розтягуючого та стискаючого напружень зовнішнього шару, часу їх дії, максимального показника напруженого стану, а також числа змін знаку напруження впродовж радіусу та товщини розтягнутого шару від основних технологічних параметрів (діаметра вилівки, товщини кокіля, часу

охолодження виливки, температури розливання, вихідної температури кокіля) при кристалізації виливка у формі.

Встановлено, що найбільший вплив на рівень розтягуючого зовнішній шар напруження оказують діаметр виливка ($D_{\text{відл}}$), товщина кокілю ($h_{\text{кок}}=100-300\text{мм}$), час охолодження виливка (досліджений інтервал $\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год) і температура кокілю перед розливкою металу ($t_{\text{кок}}=100-180^{\circ}\text{C}$). При цьому значеннями, за яких $\sigma_{\text{ост.розт.макс}}$ є мінімальним (77МПа), відповідають $D_{\text{відл}}=1060\text{мм}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=54\text{ч.}$; $t_{\text{кок}}=140^{\circ}\text{C}$.

Найбільший вплив на час дії максимального напруження розтягування зовнішнього шару ($\tau_{\text{макс.розт.}}$), оказують товщина кокілю ($h_{\text{кок}}=100-300\text{мм}$), час охолодження виливка (досліджений інтервал $\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год), температура розливки металу ($t_{\text{розл}}=1320-1430^{\circ}\text{C}$) і температура кокілю перед розливкою металу ($t_{\text{кок}}=100-180^{\circ}\text{C}$). Значеннями, за яких тривалість $\tau_{\text{макс.розт.}}$ є мінімальною (27,6 год), відповідають $h_{\text{кок}}=150\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=60$ год; $t_{\text{розл}}=1380^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{кок}}=140^{\circ}\text{C}$.

Встановлено, що найбільший вплив на рівень максимальних напружень стискання на зовнішні шари надають діаметр виливка ($D_{\text{відл}}$), товщина кокіля ($h_{\text{кок}}=100-300\text{мм}$) і час охолодження виливка ($\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год). Значеннями, у яких $|\sigma_{\text{макс.ст.}}|$ є мінімальним (12МПа), відповідають $D_{\text{відл}}=800\text{мм}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=48\text{год}$.

Найбільший вплив на час дії максимального стискаючого напруження зовнішнього шару ($\tau_{\text{макс.ст.}}$), мають діаметр виливка ($D_{\text{відл}}$) і час охолодження його у формі ($\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год). Значення, за яких $\tau_{\text{макс.ст.}}$ є мінімальним (44 год): $D_{\text{відл}}=800\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=60\text{год}$.

Встановлено, що найбільший вплив на рівень максимального показника напруженого стану ($\sigma_{\text{макс.напр.}}$) надають діаметр виливка ($D_{\text{відл}}$), температура розливання металу (досліджуваний інтервал $t_{\text{розл}}=1320-1430^{\circ}\text{C}$), час охолодження виливка ($\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год) і температура кокіля перед розливанням металу ($t_{\text{кок}}=100-180^{\circ}\text{C}$). Час вилучення виливки з кокілю, а також температура перегріву металу та розливання сильно впливають на її напружений стан і ці два фактори сумарно можуть підвищувати рівень напружень приблизно на 33%. Причому для

валка Ø800мм товщина кокілю не впливає, а для Ø1600 мм мало впливає на рівень напружень.

Показано, що при кристалізації має місце наявність напружень різного знаку по перерізу валка: для виливків Ø1060 мм та, в деяких випадках, для Ø800 мм напруження двічі змінюють свій знак, наприклад, для виливки з $D_{\text{відл}}=1060\text{мм}$; $t_{\text{розл}}=1380^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $t_{\text{кок}}=140^{\circ}\text{C}$; $\tau_{\text{вийм}}=72\text{год}$: стискаюче - 146 МПа відповідає 74,4 год, розтягуюче 116 МПа відповідає 35,2 год, остаточне розтягуюче напруження 50МПа. Тобто спочатку йде розтяг до 116 МПа, потім стискання до - 146МПа, яке потім переходить в розтяг до 50 МПа. Для Ø800 мм отримано 4 варіанти з напруженням розтягування, що наближається до 200МПа, а для Ø1060мм лише один такий варіант. Зменшення товщини кокілю не збільшує кількість таких варіантів. Великі напруження розтягування спостерігаються у випадках з часом охолодження виливка у формі меншим 48ч. Наявність напружень різного знаку по перерізу валка може негативно вплинути на експлуатацію. Внаслідок цього, є необхідним розробка регламентованих режимів термічної обробки, а також вибір оптимальних параметрів технології виготовлення виливків.

Визначено оптимальні значення параметрів, з точки зору отримання найменшого значення максимального показника напруженого стану, для валків при Ø1060мм: $t_{\text{розл}}=1420^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{кок}}=140^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $h_{\text{н}}=4,5\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=72\text{год}$ (при цих значеннях наприкінці розрахунку повністю відсутня деформація розтягування зовнішнього шару); при Ø800мм: $t_{\text{розл}}=1410^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{кок}}=200^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=150\text{мм}$; $h_{\text{н}}=6,2\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=60\text{ч}$ (товщина розтягнутого зовнішнього шару - 60мм).