

УДК 539.4

В. Калініченко¹; Н. Гопкало²

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

²Національний технічний університет "Київський політехнічний інститут"

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ ТА ГРАНИЧНИЙ СТАН РОЛИКІВ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

Резюме. Чисельним моделюванням розглянуто вплив експлуатаційних факторів на напружено-деформований та граничний стан роликів машини безперервного лиття заготовок. При невеликих швидкостях розливання сталі (0,2 м/хв.) у тонкому поверхневому шарі ролика виникають значні напруження (~ 600 МПа), які можуть викликати появу та розвиток тріщин втоми. Збільшення швидкості розливання сталі до 1,0 м/хв. підвищує безпеку експлуатації, оскільки величина напружень зменшується більш ніж удвічі, порівняно зі швидкістю 0,2 м/хв.

Тимчасова зупинка процесу лиття призводить до перегрівання частини ролика у місцях контакту ролика зі слябом і зумовлює виникнення значних напружень з одного боку ролика, які можуть спричинювати формування залишкового прогину.

Ключові слова: напружено-деформований стан, ролик машини безперервного лиття заготовок, швидкість розливання сталі, температура, напруження.

V. Kalinichenko, N. Gopkalo

EFFECT OF IN-SERVICE FACTORS ON THE STRESS-STRAIN STATE AND LIMIT STATE OF ROLLERS OF CONTINUOUS BILLET CASTING MACHINES

The summary. Numerical simulation was used to study the effect of in-service factors on the stress-strain state and limit state of rollers of continuous billet casting machines. At low steel casting rates (0.2 m/min), high stresses occur in the thin roller surface layer (~ 600 MPa), which may cause the initiation and propagation of fatigue cracks. An increase in the steel casting rate to 1.0 m/min enhances operational safety, as stresses decrease more than twofold as compared to those at the rate of 0.2 m/min.

A temporary suspension of the casting process leads to the roller overheating in the contact area between and the slab and the roller causes substantial stresses on one side of the roller that may lead to a formation of residual deflection.

Key words: stress-strain state, roller of continuous billet casting machines, steel casting rate, temperature, stress.

Вступ. Історично склалося, що в Україні розвинута мережа металургійних підприємств, на яких виробляють значну частину світового випуску сталі. Унаслідок високої ефективності безперервне розливання сталі – єдиний спосіб для отримання слябів та блюмів. На високопродуктивні слябові машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), які забезпечують широкосмугові стани заготовками, з яких прокатують товсто- та тонколистий прокат, припадає приблизно 2/3 об'єму безперервного лиття заготовок. Завдяки відносно великій ширині сляба та його товщині ролики, які працюють у складних умовах термомеханічного навантаження, найбільш напружені та визначають ресурс МБЛЗ.

Ролик МБЛЗ – це пустотілий циліндр діаметром від 140 до 600 мм, залежно від відстані до кристалізатора, довжина робочої частини 1900 – 2300 мм при загальній довжині 2400 – 4320 мм (рис.1) [1]. На машині безперервного лиття заготовок встановлено кілька сотень (500 – 800 штук) роликів, які підтримують сляб на

технологічній осі машини. Товщина сляба 250 – 300 мм, а ширина 1200 – 1900 мм. Температура на його поверхні 1300 – 1000⁰С [2]. Через внутрішню порожнину ролика Ø80 мм прокачують технічну воду для його охолодження. Швидкість обертання ролика залежить від його діаметра та швидкості переміщення сляба по технологічній осі машини в межах 0,2 – 1,0 м/хв (у нештатних ситуаціях трапляються випадки тимчасової зупинки МБЛЗ на 3 – 5 хв.). Під час контакту зі слябом у роликах виникає градієнт температури, який зумовлює термічні напруження, величина яких на поверхні залежить від швидкості розливання сталі [3].

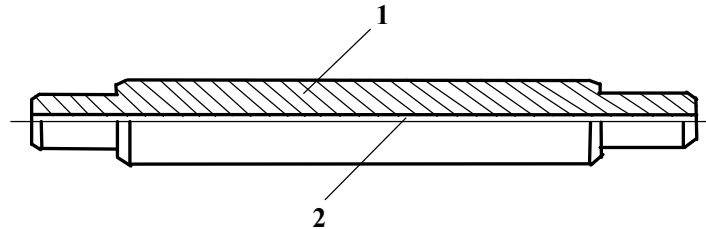


Рисунок 1 – Монолітний ролик МБЛЗ: 1 – тіло ролика, 2 – канал для охолодження [1]

В умовах експлуатації ресурс роликів МБЛЗ визначають досягненням одного з типів граничного стану (рис. 2): 1) недопустимою зміною вихідної геометрії (недопустимий прогин роликів), який зумовлює зміну прямокутного поперечного перерізу сляба на "бочкоподібний"; 2) зародження та розвиток до критичного розміру тріщин втоми, після чого відбувається катастрофічне руйнування (рис. 3); 3) недопустиме зношування робочих поверхонь, яке змінює фактуру та геометричні розміри слябів [1].

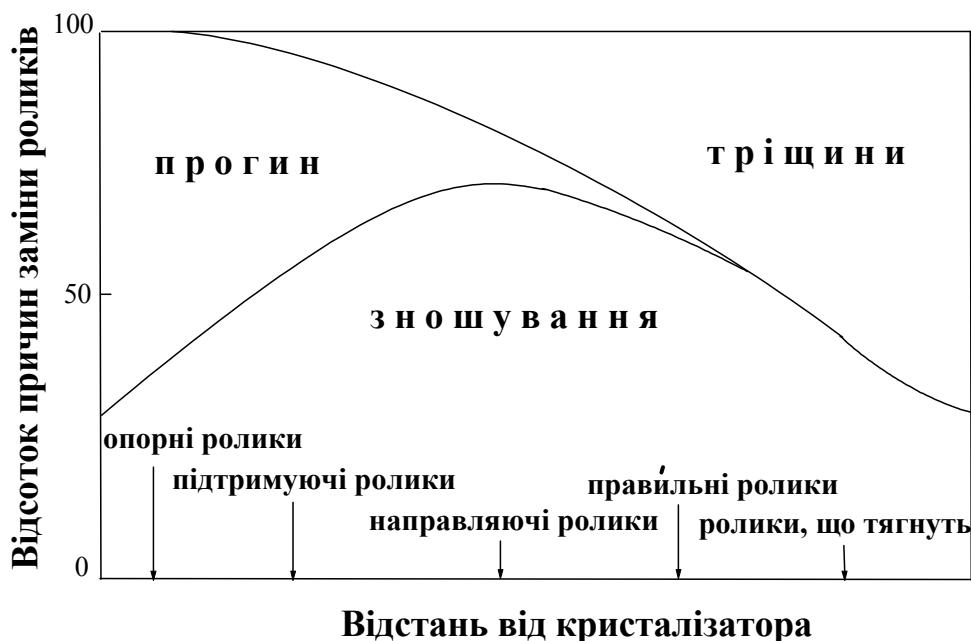


Рисунок 2 – Схематична діаграма залежності між розташуванням роликів на технологічній осі МБЛЗ та причинами їх заміни [1]

В роботі наведено результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) у пружній постановці від впливу таких експлуатаційних факторів, як температура на поверхні ролика та швидкості його обертання (розливання сталі) шляхом побудови твердотільної та скінченноелементної моделі. Проведені

розрахунки з використанням скінченноелементного комплексу MSC VisualNastran дозволили виявити загальні тенденції впливу основних експлуатаційних факторів на НДС ролика.

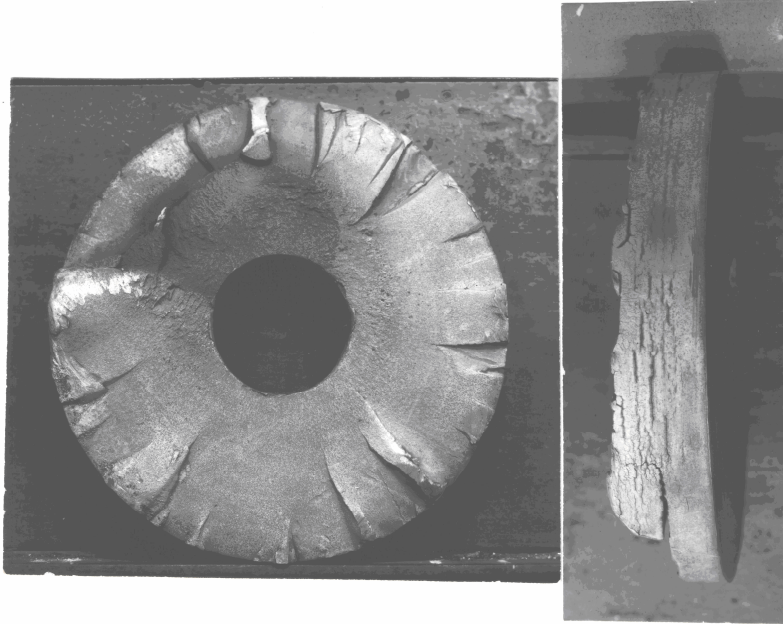


Рисунок 3 – Загальний вигляд зруйнованого ролика МБЛЗ (діаметр ролика 270 мм)

Методика розрахунку. Для розрахунку прийнято найбільш навантажений ролик з правильної ділянки МБЛЗ. Розрахунок НДС ролика з урахуванням експлуатаційних факторів проводили шляхом розв'язування задачі нестационарної теплопровідності [4] та отримання НДС методом суперпозиції. Для спрощення розрахунку розглядали $\frac{1}{2}$ частину ролика, оскільки відносно площини YZ ролик має симетрію (рис. 4). Розміри моделі, яку розбили на гексагональні скінченні елементи, є такими: довжина 1200 мм, зовнішній діаметр 270 мм, внутрішній діаметр 80 мм, ширина прикладеного гарячого тіла ($\frac{1}{2}$ сляба) – 600 мм. Модель складається з 27360 вузлів та 22230 скінченних елементів. Граничні умови прикладені до скінченноелементної моделі і максимально наближено відповідають навантаженню на ролик у реальних умовах експлуатації.

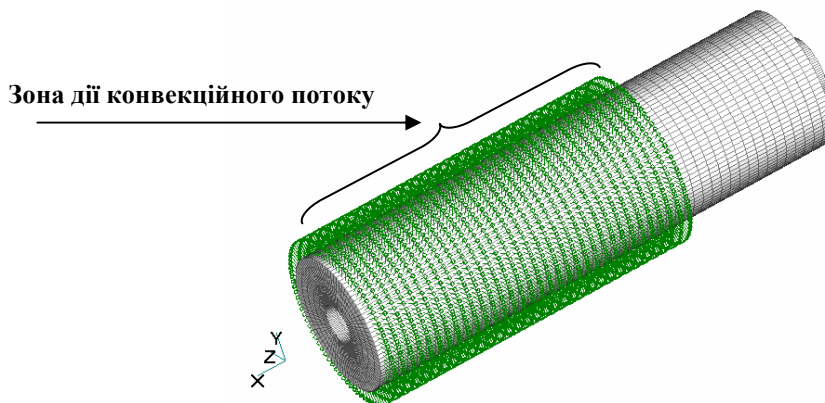


Рисунок 4 – Модель ролика із заданим конвекційним потоком по поверхні з температурою 600, 700, 800, 1000, 1300⁰С та початковою температурою оточуючого середовища $T_0=20^0$ С і температурою у внутрішньому діаметрі ролика $T_b=60^0$ С

Для розрахунків НДС ролика використовували скінченноелементний комплекс MSC VisualNastran for Windows 2003 [5, 6] (ліцензія 1410876-07592353bb492cfce94a), вибір якого зумовлений його відносною простотою та значною універсальністю. Вказаний комплекс застосовують для розрахунку стаціонарних та нестаціонарних задач теплопровідності, задач статичної термомружності, частотного аналізу, оптимізації конструкції та інших задач. Він має усі необхідні інструменти для підготовки і проведення повного циклу розрахунків.

При проведенні розрахунків методом скінченних елементів [7, 8] виникає питання вибору їх оптимальної густини. З одного боку, збільшення густини скінченних елементів підвищує точність розрахунків. Однак з іншого це збільшує час, необхідний для розрахунку. При порівнянні величин нормальних напружень та деформацій моделі, в якій густина дискретизації ролика 54180 вузлів та 44280 встановлено, що при меншій густині сітки (27360 вузлів та 22230) і меншій витраті часу на розрахунок модель дала похибку меншу за один відсоток, а тому для подальших розрахунків доцільно використовувати саме її. Необхідні для розрахунку фізичні та механічні властивості сталі 25X1M1Ф (матеріалу ролика МБЛЗ) наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Механічні та фізичні властивості сталі 25X1M1Ф

T, °C	E, МПа	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Питома теплоємність c, Дж/(кг·К)
20	$2,06 \cdot 10^5$	39,8	452
375	$1,71 \cdot 10^5$	37,2	520
600	$1,42 \cdot 10^5$	34,8	560

Процес нагрівання ролика від кімнатної температури $T_0=20^0$ С до температур ($T_1=600, 700, 800, 1000, 1300^0$ С) моделювали у вигляді прикладеного гарячого тіла та конвекційного потоку від нього по поверхні ролика, який умовно розбили на 30 секторів, кожен з яких складається із трьох скінченних елементів. Вибраний діапазон температур включає основні можливі експлуатаційні й нештатні ситуації, а також деякі завищені температури для виявлення загальних тенденцій їх впливу на НДС ролика. При цьому вважали, що три скінченні елементи поверхні ролика контактують зі слябом. Для елементів на поверхні ролика вздовж осі X конвекційний потік із заданою температурою задавався як функція часу. Тобто залежно від швидкості його обертання, а відповідно часу контакту ролика зі слябом, температура змінювалась для окремих елементів на поверхні скінченноелементної моделі від температури оточуючого середовища ($T_0=20^0$ С) до температури, що відповідала заданій (рис.5). Для зручності розрахунку при температурах 600, 700, 800, 1000, 1300⁰С будували графіки залежності не від абсолютних значень температури та часу, а від коефіцієнта K, який множиться на задану температуру. На рисунку 5а, 5б показано графіки розподілу температури по поверхні ролика від часу для 20 та 30 секторів.

Температуру внутрішньої порожнини ролика, через яку прокачують технічну воду для його охолодження, задавали у вузлах із значенням $T_n=60^0$ С. Отримані дані з розв'язку задачі нестаціонарної теплопровідності задавали як початкові умови для розрахунку напружено-деформованого стану ролика.

На прикладі двох окремо взятих секторів (20 і 30, рис. 5 а, б) визначили, що для кожного з 30 секторів моделі будували графік залежності температурного коефіцієнта K від часу таким чином, щоб реалізувати ефект обертання ролика із заданими швидкостями, оскільки програмний комплекс Nastran не передбачає розв'язування динамічних задач. Відстань між вершинами графіка, при максимальному значенні

коефіцієнта K , відповідатиме повному оберту ролика за час, який залежить від швидкості обертання.

На рис. 5 а, б бачимо, що при швидкості розливання сталі 0,2 м/хв для сектора №20 матеріал ролика прогрівається до заданих температур раніше, ніж для сектора №30. А при швидкості розливання сталі 1,0 м/хв навпаки: матеріал сектора №30 прогрівається до заданих температур раніше, ніж для сектора №20.

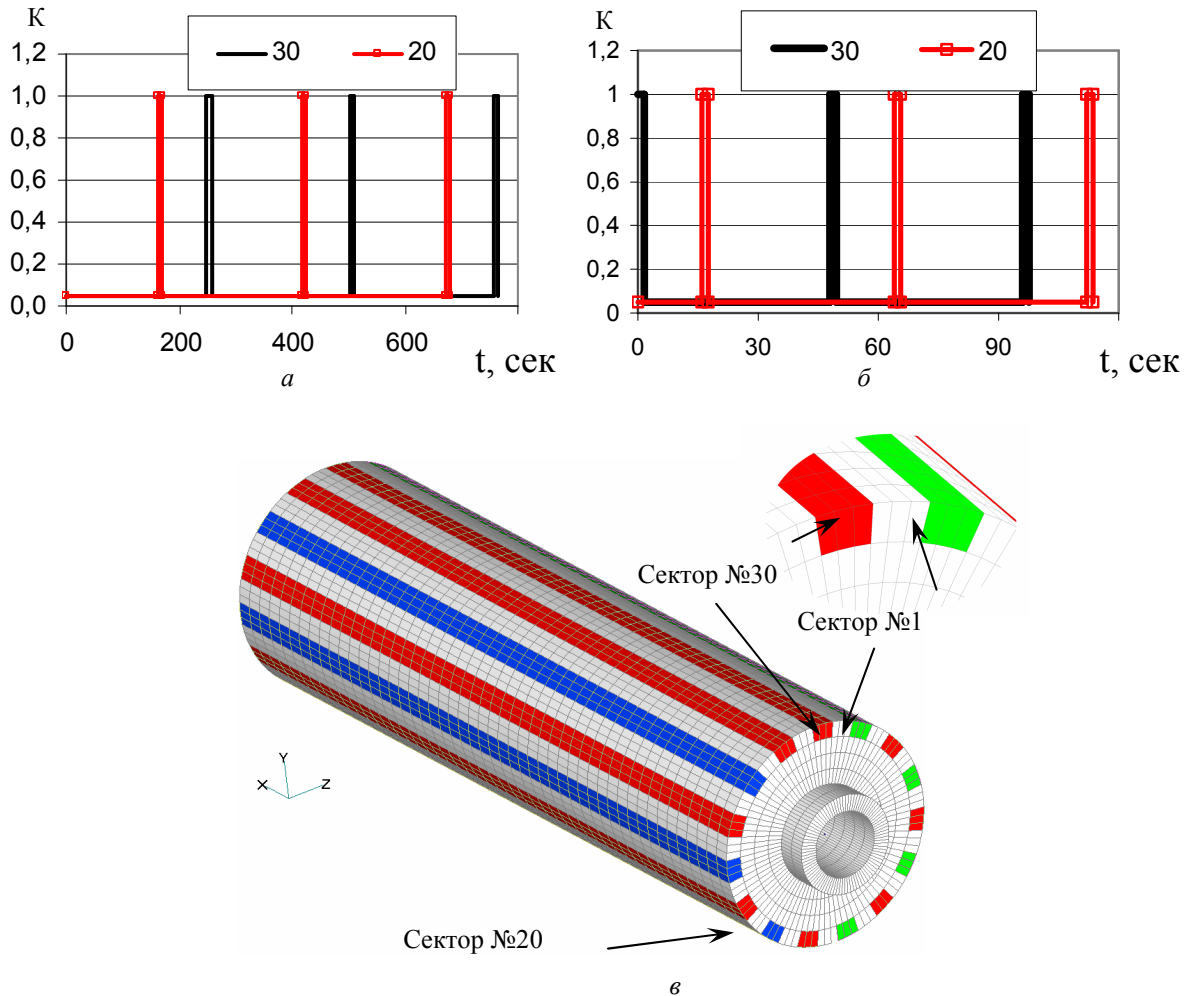


Рисунок 5 – Залежність розподілу температури по поверхні ролика від часу для максимальних значень температур 600, 700, 800, 1000, 1300⁰С для швидкості обертання ролика 0,2 м/хв. – а та для швидкості 1м/хв. – б. ½ частина моделі ролика та виділені різними кольорами сектори – в

Результати розрахунку. Результатом розрахунку були температурні поля та НДС ролика залежно від варіювання температури і швидкості обертання в інтервалі часу від 0-ї до 999-тої секунди, який вибирали з міркувань отримання повної картини кінетики розподілу температури для кількох обертів ролика після запуску МБЛЗ (за цей час ролик зробить майже чотири оберти при швидкості розливання сталі 0,2 м/хв, а при швидкості розливання сталі 1,0 м/хв – майже двадцять). Як приклад, на рис. 6 зображено розподіл температурного поля у ролик під час обертання з 31 сек. від початкового моменту часу, а на рис. 7 – графік температури для трьох довільно (№27118, 19726, 14182) вибраних вузлів на його поверхні.

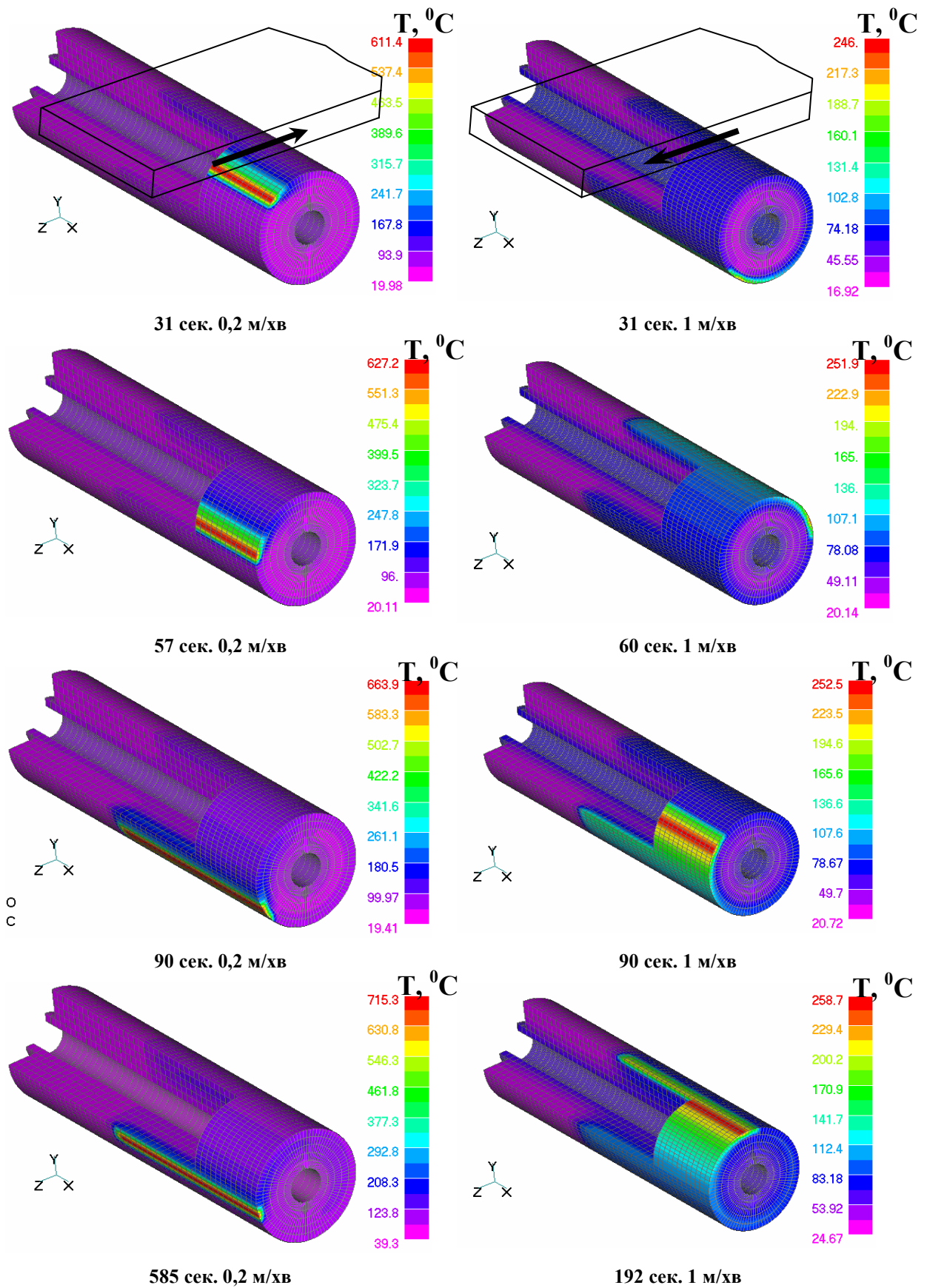


Рисунок 6 – Розподіл температурного поля у ролик при швидкості обертання 0,2 та 1,0 м/хв з температурою на поверхні сляба 1300⁰ С. Значення температурного розподілу отримані приблизно в однаковий інтервал часу (31, 60, 90 сек.) і періоди, коли температурне поле практично не змінюється з часом (585 сек. для швидкості 0,2 м/хв і 192 сек. для швидкості 1,0 м/хв)

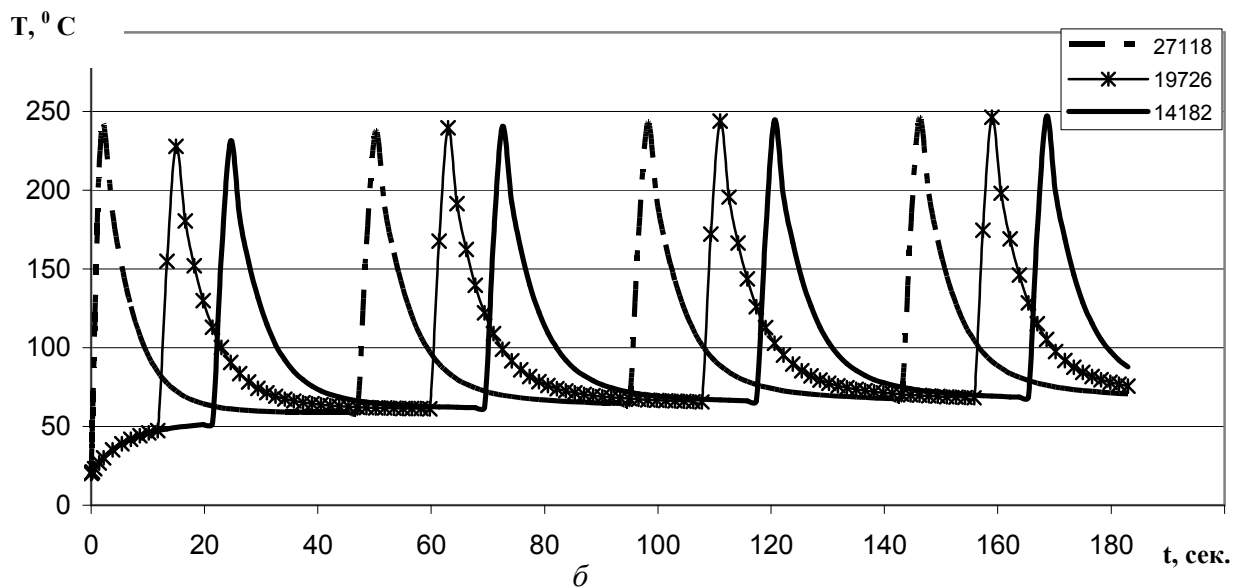
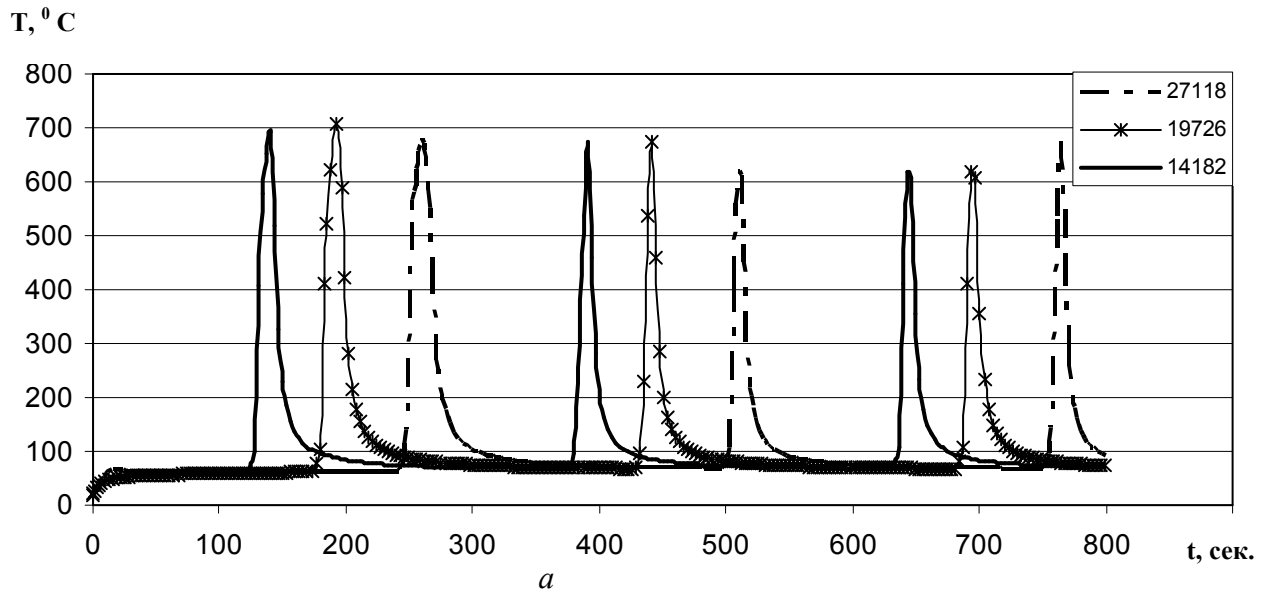


Рисунок 7 – Розподіл температури для трьох окремих вузлів №27118, 19726, 14182 на поверхні ролика при температурі сляба 1300°C : а) при швидкості обертання 0,2 м/хв; б) при швидкості 1 м/хв

На рис. 7 бачимо, що збільшення швидкості розливання сталі з 0,2 м/хв до 1,0 м/хв зменшує приблизно утричі рази температуру на поверхні ролика.

Розрахунок НДС. Отриманий розподіл температури по об'єму ролика (рис.6) використовували як початкові граничні умови для розрахунку його НДС, з урахуванням закріплення у площині симетрії його вільного краю.

Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом (рис.8) по об'єму ролика від дії температурного поля у ролику подібний за характером до поля температур (рис.6). Найбільш напруженими є поверхневі шари ролика, в яких під час роботи виникають знакозмінні напруження (рис.9), що призводить до втомного розтріскування поверхневих шарів і їх відшарування, яке погіршує якість поверхні сляба. Так, для усталених періодів, коли температурне поле практично не змінюється з часом (585 сек. для швидкості 0,2 м/хв та 192 сек. для швидкості 1,0 м/хв, рис. 6) при швидкості розливання сталі 0,2м/хв напруження удвічі вищі, ніж при швидкості розливання сталі 1,0 м/хв (рис. 9), тому зменшення швидкості розливання сталі (швидкості обертання роликів) або тимчасова зупинка процесу розливання не бажані.

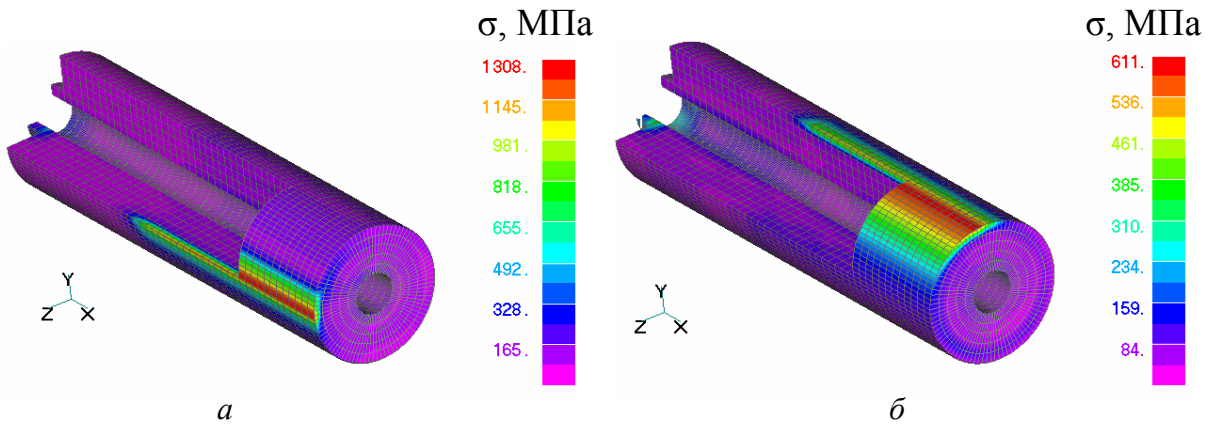
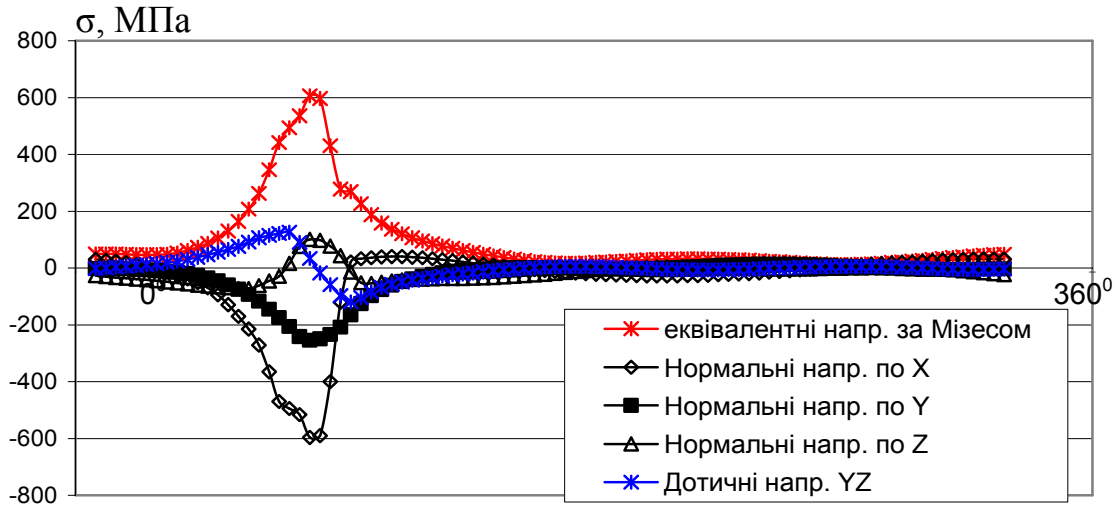
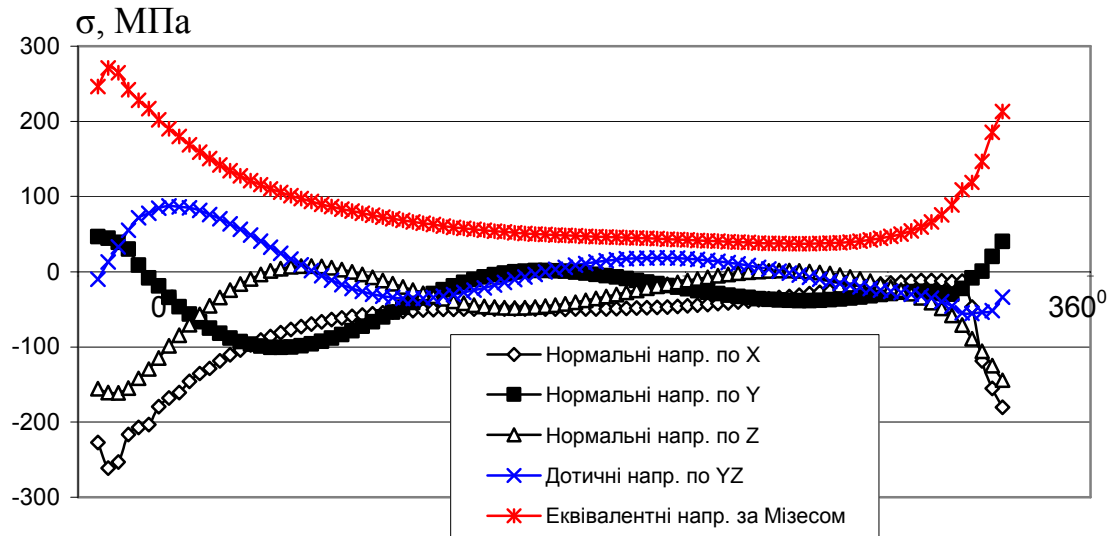


Рисунок 8 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом від дії температурного поля у ролику при швидкості обертання: а) 0,2м/хв. на 585 сек.; б) 1м/хв. на 191 сек.



а



б

Рисунок 9 – Середні значення напружень у скінченних елементах (по довжині кола в градусах від 0 до 360⁰) розташованих по максимальному діаметру при швидкості обертання а) 0,2м/хв, б) 1м/хв

Розрахунок НДС ролика від впливу тимчасової зупинки МБЛЗ значно спрощується, зникає необхідність у задаванні для кожного сектора функції часу залежно від коефіцієнта температури і не потрібно обчислювати задачу нестационарної теплопровідності. Достатньо задати температуру на поверхні ролика, яка передає йому нагріте тіло (сляб), та температуру охолодження у внутрішньому отворі, зробити розрахунок задачі стаціонарної теплопровідності і отримані дані використати для розрахунку НДС від розподілу температури по об'єму ролика (рис.10).

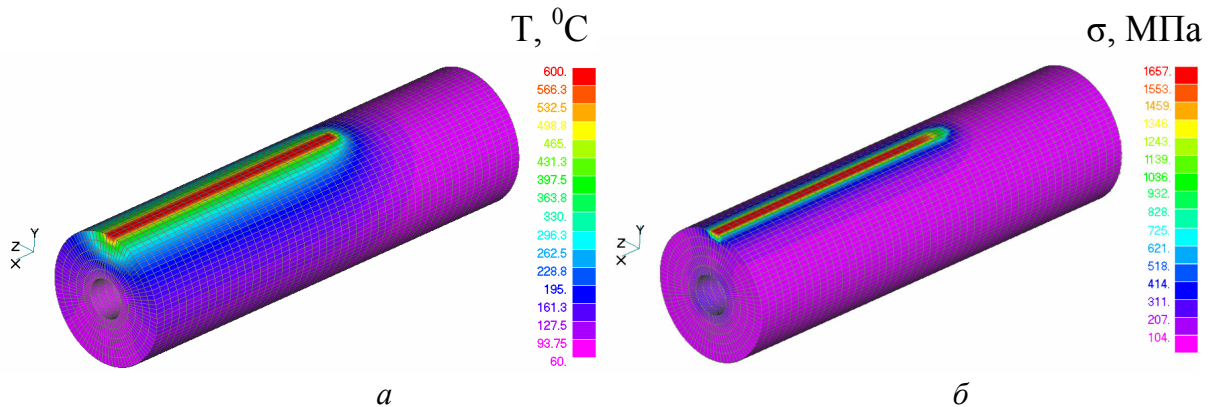


Рисунок 10 – Скінченно елементна модель з розподілом температур у ролику від нагрітого сляба з температурою 600°C : а) при тимчасовій зупинці; б) розподілом еквівалентних напружень від температурного поля

З отриманих даних отримали, що при тимчасовій зупинці навіть при невисокій температурі (600°C) напруження на поверхні досягають значення у 1657 МПа. Результати обчислень у наведених координатах (біжучі напруження зараховано до напружень при 600°C) розрахунків напружень показують, що для стаціонарної задачі теплопровідності у пружній постановці зростання напружень відбувається пропорційно зі зростанням температури (рис. 11).

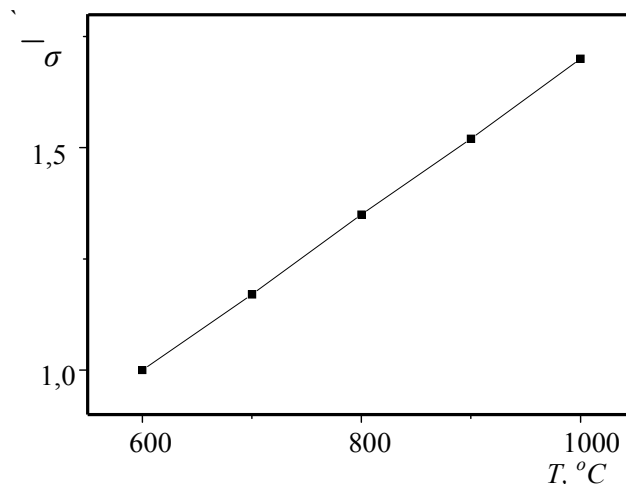


Рисунок 11 – Залежність зростання напружень від підвищення температури на поверхні ролика при тимчасовій зупинці МБЛЗ

Порівнюючи графіки еквівалентних напружень за Мізесом уздовж осі Y на рис.12 бачимо, що при температурі на поверхні ролика 1300°C , при швидкості розливання сталі 1,0 м/хв напруження менші (більш ніж удвічі), ніж при швидкості розливання сталі 0,2 м/хв. А короточасна зупинка МБЛЗ при температурі на поверхні ролика 600°C зумовлює виникнення напружень навіть більших, ніж при швидкості

розливання сталі 0,2 м/хв при температурі на поверхні ролика 1300⁰С. Звідси можна зробити висновок, що підвищення швидкості обертання ролика (швидкості розливання сталі) призводить до зниження напруженого стану на його поверхні, а зменшення швидкості збільшує напруження і може спричинити втомне розтріскування поверхневих шарів. Тимчасова зупинка МБЛЗ, унаслідок виникнення значних односторонніх напружень, може призвести до формування залишкового прогинання ролика.

У роботі [9] наведено дані розрахунку (у пружній постановці задачі) еквівалентних напружень за Мізесом для роликів діаметром 300 мм із сталей 15X1M1Ф, 30X13 та 34ХН1М при температурах у зоні контакту 600 – 700⁰С. Визначені для цих роликів еквівалентні напруження складають 1000 – 1300 МПа, які добре співпадають з отриманими в даній роботі еквівалентними напруженнями (1308 МПа) для сталі 25X1M1Ф при швидкості розливання сталі 0,2 м/хв (рис.8а). У роботі [9] також зазначено, що значення еквівалентних напружень перевищують границю текучості матеріалу у тонкому поверхневому шарі у зоні контакту ролика зі слябом, а при підвищенні швидкості розливання сталі вони зменшуються.

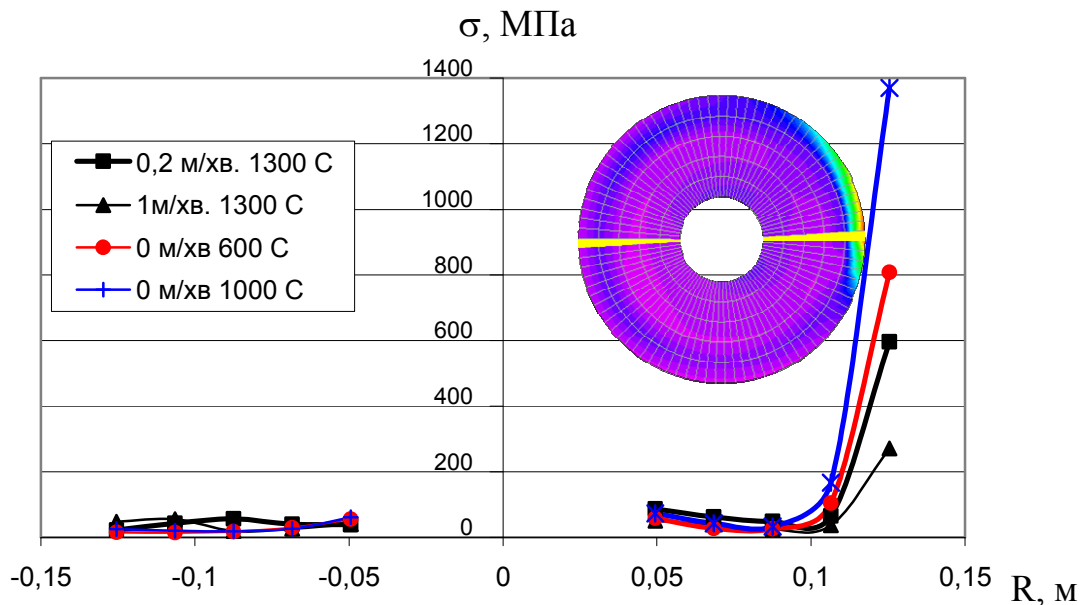


Рисунок 12 – Значення еквівалентних напружень за Мізесом в елементах за напрямком дії максимальних значень. Зліва від осі показано напруження ролика в його протилежній частині від контакту зі слябом, а праворуч – при контакті зі слябом

Оскільки для спрощення виявлення загальних тенденцій впливу розглянутих експлуатаційних факторів на НДС ролика в даній роботі розрахунки виконано при пружній постановці задачі і вибраний діапазон температур включає основні можливі експлуатаційні й нештатні ситуації, а також деякі завищені температури, то отримані максимальні абсолютні значення напружень значно перевищують характеристики міцності сталі. Таке спрощення алгоритму чисельного моделювання впливу таких експлуатаційних факторів як температура на поверхні ролика та швидкість його обертання (розливання сталі) дозволило з меншими затратами часу виявити загальні тенденції їх впливу на НДС ролика.

Висновки. Розроблено алгоритм розрахунку НДС роликів МБЛЗ від впливу експлуатаційних температурочасових факторів. Аналіз впливу розглянутих факторів показав, що температура на поверхні сляба, швидкість його переміщення та тимчасові зупинки визначають граничний стан ролика. При невеликих швидкостях розливання сталі (0,2 м/хв.) у тонкому поверхневому шарі ролика виникають значні напруження (~ 600 МПа), які можуть зумовити появу та розвиток тріщин втоми. Збільшення

швидкості розливання сталі до 1,0 м/хв підвищує безпеку експлуатації, бо величина напружень зменшується більш ніж удвічі, порівняно зі швидкістю 0,2 м/хв.

Тимчасова зупинка процесу лиття призводить до перегрівання частини ролика у місцях контакту ролика зі слябом і зумовлює виникнення значних напружень з одного боку ролика, які можуть спричинити формування залишкового прогину.

Література

1. Отчет о научно-исследовательской работе № $\frac{34000122}{82831784}$ (709–1) н/3 7082-381. Исследование условий эксплуатации и разработка новых конструкций роликов повышенной стойкости для МНЛЗ (Заключительный). ВНИИМЕТМАШ. Москва 1983. –79с.
2. Домбровский Ф.С. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф.С. Домбровский, Л.К. Лещинский – К.: Институт электросварки им.Е.О.Патона, 1985. – 198с.
3. Буланов Л.В. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет. / Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П. и др. – Уральский центр ПР и рекламы. — "Марат", 2004. – 349 с.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности / Лыков А.В. – М.: Высш. Школа, 1967. – 599с.
5. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций MSC/NASTRAN for Windows / Шимкович Д.Г. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
6. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC. Visual Nastran for Windows / Шимкович Д.Г. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 704 с.
7. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон // М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
8. Мяченков В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов / Мяченков В.И., Мальцев В.П., Майборода В.П. – М.: Машиностроение, 1989. – 576 с.
9. Голицына Е. В. Математическое моделирование температурного поля в полом вращающемся цилиндре при нелинейных граничных условиях / Е.В. Голицына // Теплофизика высоких температур. Ноябрь-Декабрь. – 2008. – том 46, № 6. – С. 905 – 910.

Одержано 20.02.2010 р.