

Кафедра машинобудування та прикладної механіки

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Дослідження впливу процесу твердіння безперервнолитого
сляба на дефекти прокату»

Студента II курсу групи МО-19дм
напряму підготовки: 133 Галузеве машинобудування

(*nidnuc*)

(*nidnuc*)

(*nidnuc*)

(*nidnuc*)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра «Машинобудування та прикладної механіки»

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки 133 галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф. Соколов В.І.

« _____ » _____ 2020 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Федаку Миколі Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження впливу процесу твердіння безперервнолитого
сляба на дефекти прокату»

керівник роботи Боровік Павло Володимирович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «30» листопада 2020 року № 169/15.28

2. Строк подання студентом роботи січень 2021 року

3. Вихідні дані роботи Матеріали практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 Реферат. Вступ. Розділ 1. Аналіз причин та наслідків формування хімічної неоднорідності
 безперервнолитої заготовки Розділ 2. Опис способу проведення досліджень. Розділ 3.
 Математичне моделювання процесу гарячої прокатки Розділ 4. Висновки і рекомендації.
 Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу: Плакати до презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «14» грудня 2020 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Згідно з календарним планом – графіком, затвердженим кафедрою «Машинобудування та прикладної механіки», що до виконання бакалаврських робіт		

Студент

(підпис)

Федак М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту

(підпис)

Боровік П.В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Федак М.О. Магістерська робота на тему: «Дослідження впливу процесу твердіння безперервнолитого сляба на дефекти прокату». Напрямок підготовки «Галузеве машинобудування», Сєвєродонецьк, 2021 р.

Магістерська робота містить 50 стор., 23 рис., 2 таб., демонстраційних плакатів формату А1 у графічній частині проекту; складається із вступу, чотирьох розділів, переліку джерел посилання.

Приведений опис безперервного розливання сталі. Вказані причини формування хімічної неоднорідності безперервнолитої заготовки, а також її вплив на параметри та результати гарячої прокатки. Описаний спосіб проведення досліджень на базі математичного моделювання з використанням методу скінченних елементів. Представлені отримувані результати математичного моделювання. Вказані можливості щодо врахування хімічної неоднорідності безперервнолитої заготовки при математичному моделюванні методом скінченних елементів. Зроблені висновки та запропоновані рекомендації.

БЕЗПЕРЕРВНОЛИТІ СЛЯБИ, ОПІР ДЕФОРМАЦІЇ, СКІНЧЕННІ ЕЛЕМЕНТИ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРИЧИН ТА НАСЛІДКІВ ФОРМУВАННЯ ХІМІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОЇ ЗАГОТОВКИ	8
1.1 Безперервне розливання сталі	8
1.2 Причини неоднорідності безперервнолітої заготовки	10
1.3 Вплив неоднорідності заготовки на параметри та результати гарячої прокатки	17
РОЗДІЛ 2 ОПИС СПОСОБУ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	19
2.1 Загальний опис моделі	19
2.1.1 Структура моделі	19
2.1.2 Оцінка сталого стану процесу	21
2.1.3 Зредуковане інтегрування	22
2.2 Формулювання ALE	23
2.3 Модель тертя Кулона	24
2.4 Моделювання можливих пошкоджень	25
2.4.1 Моделі пошкодження	25
2.4.2 Діаграми руйнування	26
2.4.3 Критерії руйнування	27
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ	28
3.1 Параметри моделювання	28
3.1.1 Властивості матеріалу	28
3.1.2 Початкові умови	29
3.2 Результати моделювання	30
3.2.1 Сталий стан	30
3.2.2 Напружено-деформований стан слябу при сталому процесі прокатки	32

РОЗДІЛ 4 РОЗВИТОК МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ТВЕРДІННЯ	41
РОЗДІЛ 5 ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	46
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	48

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з основних технологічних рішень, що сприяють зниженню витрат вітчизняного виробництва і підвищують його ефективність є безперервне розливання сталі.

Хімічний склад отриманого безперервним способом металу і технологічні параметри реалізації процесу в значній мірі визначають характер кристалізації злитка, утворення хімічної неоднорідності по його перетину, схильність до дефектоутворення і надалі експлуатаційні характеристики.

Різна розчинність хімічних елементів в рідкій і твердій фазах обумовлює хімічну неоднорідність злитка. В процесі зростання твердої фази на фронті кристалізації відбувається накопичення ліквуючих домішок. Висока якість безперервнолитого металу в значній мірі залежить від можливості прогнозування і управління його внутрішньою структурою на підставі відомостей про параметри розливання і хімічний склад сталі.

В ході рішення задачі ефективного впливу на основні технологічні параметри процесу кристалізації, необхідно забезпечити прогнозованість виникнення дефектів в безперервнолитих заготовках, особливо в умовах збільшення швидкості безперервного розливання.

Нерівномірний розподіл хімічних елементів по перетину безперервнолитої заготовки значно впливає на напружено-деформований стан металу при подальшій прокатці, збільшуючи або зменшуючи можливість утворення дефектів. Існуючі математичні моделі напружено-деформованого стану безперервнолитих заготовок засновані на припущенні рівномірного розподілу хімічних елементів по перетину заготовки, що звужує можливість їх вживання та знижує точність прогнозу дефектоутворення та якості.

Мета досліджень: аналіз процесу прогнозування виникнення дефектів безперервнолитого металу на базі розробленої математичної моделі.

Об'єкт досліджень. безперервнолиті заготовки в умовах виготовлення та подальшої обробки.

Предмет досліджень. Напружено-деформований стан безперервнолитої заготовки в умовах гарячої прокатки.

Методи досліджень. Математичне моделювання та теоретичний аналіз напружено-деформованого стану безперервнолитої заготовки в умовах прокатки.

Результати роботи можна використовувати при дослідженні впливу умов деформування слябів на напружено-деформований стан металу при розробленні технологічних режимів безперервного розливання марок сталей та прогнозуванні виникнення дефектів при гарячій прокатці.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРИЧИН ТА НАСЛІДКІВ ФОРМУВАННЯ ХІМІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОЇ ЗАГОТОВКИ

1.1 Безперервне розливання сталі

Ідея безперервного лиття була висунута в 1857 році Бессемером [1].

Переваги методу безперервного лиття заготовок полягають в наступному [1]:

- капітальні витрати знижуються на 30%;
- підвищується продуктивність праці на 15...20%;
- збільшується вихід придатного на 10...20)%;
- поліпшується якість і структура металу;
- енергозбереження на 40...50% (до 80%);
- створюються умови для повної механізації і автоматизації.

Конструкційне оформлення машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) безперервно розвивається протягом всього періоду їх застосування в промисловості. Основні конструктивні і технологічні рішення зазвичай спрямовані на підвищення продуктивності МБЛЗ, її компактність, забезпечення високої якості заготовки, зниження трудомісткості процесу, зменшення енерговитрат та підвищення забезпеченості автоматичними системами управління. Основними питаннями при цьому є раціональна конфігурація, розташування і протяжність головної технологічної осі, профіль поперечного перерізу заготовки, поєднання дискретного характеру подачі стали від плавильного агрегату з безперервною роботою МБЛЗ і т.ін.

Існують наступні типи машин:

- вертикальні;
- баштові з вигином;
- радіальні ($R = \text{const}$);
- криволінійні ($R \neq \text{const}$);
- похилі і похило–криволінійні (прямолінійні і криволінійні);

- горизонтальні;
- роторні.

В сучасних умовах розвитку МБЛЗ найбільше застосування отримали машини радіального та криволінійного типу.

Основні параметри [1] вибирають в залежності від призначення і умов роботи МБЛЗ в комплексі металургійного виробництва. Визначальні фактори – марочний склад оброблюваних сталей, розміри і форма поперечного перерізу заготовок, місткість сталерозливного ковша, цикл подавання ковшів на МБЛЗ, розташування її в цеху.

Основним напрямком поліпшення техніко-економічних показників отримання металопродукції в сучасних умовах є зниження ресурсо- і енерговитрат, а також підвищення її експлуатаційних і якісних показників. У той же час ефективність процесу безперервного розливання істотно залежить від технологічних параметрів рідкого металу забезпечуваних позапічної підготовкою до розливання, а також організації та суворого дотримання заданих параметрів і умов поведінки металу в проміжному ковші, кристалізаторі і зоні вторинного охолодження.

Висока якість безперервнолитого металу в значній мірі залежить від можливості прогнозування та управління його внутрішньою структурою на підставі відомостей про параметри розливання і хімічний склад стали.

У процесі кристалізації зазвичай утворюються кристали твердого розчину дендритного типу. Тому осі першого порядку, які виникають в початковий момент кристалізації, мають в своєму складі переважно більш тугоплавкий компонент сплаву. Периферійні шари кристала і міжосьових просторів кристалізуються в останню чергу і збагачуються менш тугоплавкими компонентами сплаву. В результаті утворюються кристали, неоднорідні за своїм хімічним складом.

1.2 Причини неоднорідності безперервнолитої заготовки

Загальні закономірності теорії кристалізації і неоднорідності зливка виявляються і при безперервному розливанні, проте розвиток і вплив їх на якість металу має свої особливості. Безперервне розливання відрізняється складним поєднанням проблем, характерних як для металургійних, фізико-механічних і термодинамічних процесів, так і для механіки. Цей взаємозв'язок в значній мірі обумовлює стабільність процесу і якість металу. Безперервна заготовка формується в умовах вельми розвиненої протяжності рідкої фази, що досягає десятків метрів, і інтенсивного розвитку конвективних потоків, що впливають на структурну і хімічну неоднорідність. Не дивлячись на велику кількість проведених досліджень і величезний потік інформації, наявні відомості недостатні для надійного управління кристалізаційними і ліквацийними процесами в безперервно литій заготовці.

Встановлено, що метал безперервного розливання більш однорідний по перетину і висоті заготовки, ніж зливки, відлитий традиційним способом, – в виливниці. Відзначаються підвищені властивості міцності і пластичності, опір утомленості, збільшена на 10-18 % ударна в'язкість. Це обумовлено меншим поперечним перетином і інтенсивним охолодженням заготовки. [2]

Проте підвищення інтенсивності процесу, швидкості розливання, збільшення перетину литих заготовок ставить нові задачі.

У роботі [3] відзначається збагачення центральної зони безперервного зливка ліквацийними елементами через витіснення залишкового розплаву фронтом кристалізації. Наголошується, що дефект не може бути усунений. Зниження ліквациї можна досягти шляхом обмеження вмісту елементів, що ліквують в сталі, і дотримання оптимальних умов литва. Слід розуміти, що ліквация в центральній зоні обумовлена виборчим характером кристалізації, а питання про «оптимальні умови» залишається відкритим.

Схильність елементів до розвитку дендритної неоднорідності характеризується ефективним коефіцієнтом розподілу в рідкій і твердій фазах, а скінчена

неоднорідність визначається повнотою проходження дифузійних процесів, яка в свою чергу залежить від швидкості кристалізації металу [4].

Детальний аналіз різних схем впливу швидкості кристалізації на характер дендритної ліквації при затвердінні різних сплавів [5] свідчить, що одним з впливових засобів придушення розділової дифузії є значне прискорення процесів теплопроводу і затвердіння. Експериментально встановлено, що ліквація сірки, фосфору і азоту може бути виключена, якщо швидкість просування фронту кристалізації перевищує 0,3 мм/с. За даними роботи [6], при кристалізації простих вуглецевих і низьколегованих сталей зональна ліквація не виникає, якщо швидкість кристалізації перевищує 0,7-1,0 см/хв. Середня швидкість просування фронту кристалізації в безперервнолитій заготовці перевищує вказану до товщини принаймні 60-65 мм від поверхні. В цілому швидкість кристалізації по всьому перетину безперервнолитого зливка перевищує відповідну швидкість кристалізації звичного зливка, відлитого в виливницю [7]. Тому структура в першому випадку характеризується меншими розмірами зерен і тоншими межами між ними. Розмір зерен плавно збільшується від периферії до центру зливка. Площа, зайнята дендритами, складає 85-88 % (в звичному зливку – 75 %) [8]. Дендритна неоднорідність на 20-30 % нижче, у зв'язку з чим зменшується (в середньому на 30 %) анізотропія механічних властивостей [9]. Це пояснюється більшою інтенсивністю охолодження безперервнолитого зливка і пов'язаним з ним незначним розвитком зони двофазного стану.

За даними робіт [10,11], при зміні швидкості руху міжфазної поверхні в стані стабілізації концентраційного ущільнення в твердій фазі утворюється локальна зміна концентрації. Збільшення швидкості приводить до створення прошарку з вищим вмістом домішки в порівнянні з середнім складом твердої фази і навпаки.

Тому при періодичній зміні швидкості руху міжфазної межі виникатиме шарувата хімічна неоднорідність [10].

Питання про періодичні процеси при кристалізації металів і сплавів обговорюються вже протягом десятків років. Проте, принаймні в частині вивчення

сталевих злитків і відливок, обговорення ведеться на рівні якісної характеристики процесу, при цьому слід зазначити деяку суперечність поглядів. Відсутність глибших досліджень параметрів цього процесу, його кількісної оцінки пояснюється складністю самого явища і відсутністю засобів для його вивчення. Тому по періодичній кристалізації до теперішнього часу немає загальноприйнятих уявлень.

У роботі [11] на підставі висновку, що швидкість кристалізації безперервного злитка в процесі всього періоду його формування (у тому числі і центральних об'ємів металу) вища за критичні швидкості кристалізації, при яких можлива зональна ліквіація, робиться висновок про те, що можна чекати рівномірного розподілу всіх елементів по перетину.

Серйозним дефектом є осьова пористість, збагачена лікватами, які не завжди заварюються в процесі гарячої пластичної деформації. Розвинена зона стовбчастих кристалів багато в чому сприяє посиленню осьовій ліквіації.

У роботі [12] указується, що з підвищенням вмісту вуглецю ступінь дендритної неоднорідності (зокрема, хрому і марганцю) збільшується. Це пов'язано з розширенням інтервалу кристалізації сплавів на основі заліз, яке призводить до того, що розділова дифузія в рідкій фазі протікає більш повно, тоді як проходження вирівнюючої дифузії обмежено нижчою температурою кінця кристалізації сталі.

У тій же роботі проводиться аналітичний аналіз розподілу домішок перед рухомим фронтом затвердіння і робиться висновок про те, що зональна неоднорідність на ділянці від поверхні до осі не одержує значного розвитку.

У одній з робіт [13] на рівні стану розвитку процесу того часу, наголошувалася помітна ліквіація як на квадратних заготовках (до 1,5 по вуглецю і 2,0 по сірці), так і на листових (до 1,7 по вуглецю і сірці). Досліджуючи механічні властивості прокату, автори роблять висновок про те, що при прокатці безперервнолитого металу в порівнянні з прокаткою звичайного потрібне менше обтискання для досягнення однакових механічних властивостей. Зокрема, при прокатці зливків перетином 130-130 мм з легованої конструкційної сталі достатній

ступінь обтискання 4,2. З подальшим збільшенням ступеня обтискання межі текучості і міцності практично не змінюються. Проте вже в роботі [13] наголошується, що в окремих випадках при значному розвитку ліквацийних явищ і осьової пористості в металі спостерігається зниження втомних характеристик, є випадки по відносному подовженню, незадовільні результати при випробуванні на холодний вигин навкруги оправки, рівній половині товщини листу і т.д.

При описанні механізму ліквацийних явищ в зливках спокійної сталі головна увага надається значній глибині рідкої фази і утворенню у зв'язку з цим «мостів» і перехоплень, що ускладнює живлення ніжчележачих об'ємів рідким металом. Щодо конвективної дифузії, що викликає збагачення рідкої фази домішками, передбачається, що в зону кристалізації, розташовану нижче за перехоплення, поступатиме метал, що збагачений домішками.

На підставі досліджень хімічної неоднорідності плоских заготовок в роботах [14,15,16] були зроблені наступні висновки. За певних умов в зливках безперервного розливання прямокутного перетину з великим співвідношенням сторін хімічна неоднорідність може мати значний розвиток (осьова і внецентрова ліквация). Встановлено також підвищення вмісту ліквуючих домішок в 1,3-1,7 рази. Чим сильніше осьова ліквация, тим більше «штрихова» по осі листів. Груба осьова ліквация приводить до розшарування. Механічні випробування стандартних зразків, вирізаних з осьової зони листів уздовж напрямку прокатки, показали, що посилення дефекту «штрихуватості» приводить до зниження межі міцності до 16,7 %, межі текучості до 28 %, ударної в'язкості до 13,8 %.

Підвищення температури металу викликає посилення ліквации на 40-45 % по фосфору і сірці і на 30 % по вуглецю.

Дані про вплив швидкості розливання на хімічну неоднорідність суперечливі. В роботі [1] указується, що з підвищенням швидкості розливання в інтервалі 0,3-0,55 м/хв осьова ліквация зростає на 30 % (за бальною оцінкою з 1,5 до 3,5) для всіх марок сталі. При розливанні вуглецевої сталі з підвищенням швидкості осьова ліквация знижується, а при розливанні сталі марок 20X, 40X – зростає [15]. Збільшення товщини зливка в діапазоні 0,150-0,175-0,2 м веде до поси-

лення осьової ліквациї на 0,4-1,5 бала. Утворення ліквацийних зон зв'язується з нерівномірним вторинним охолодженням, хоча вплив інтенсивності охолодження в діапазоні 0,4-0,8 л/кг не відзначено. Рекомендується також збільшення швидкості кристалізації і розширення зони рівноосних кристалів.

Дані про вплив умов охолодження на хімічну і кристалічну неоднорідність [17] свідчать, що ефективний коефіцієнт розподілу зростає із збільшенням вмісту домішок в сталі. Ототожнюючи в умовах експерименту швидкість кристалізації із швидкістю розливання, пропонується для запобігання виникненню зональної ліквациї збільшувати швидкість витягання заготовки. Збільшення швидкості кристалізації з підвищенням швидкості розливання підтверджується в багатьох роботах [8; 18]. В останній роботі указується на збільшення ефективного коефіцієнта розподілу з 0,905 до 0,965 з підвищенням швидкості розливання.

Останніми роками в зарубіжній літературі з'явилися публікації, присвячені дослідженню процесів виникнення і формування хімічної неоднорідності в плоскій литій заготовці, які заслуговують уваги.

У оглядовій інформації по аналізу впливу параметрів технології на якість слябів [19] відзначається наступне. Інтенсивність утворення подовжніх зовнішніх тріщин можна регулювати шляхом вибору типу порошкоподібних шлаків, що подаються в кристалізатор. На утворення внутрішніх осьових тріщин сильно впливає швидкість розливання і тиск на зливочні роликів, що тягнуть. Вважають, що головною причиною утворення цих тріщин є випучування і прокатка зливка поблизу ділянки повного затвердіння. Число тріщин скорочується із збільшенням інтенсивності охолодження з 0,83 л/кг до 0,95 л/кг. При цьому потужність на електроприводах кліті, що тягне, зменшується на 30 % ($v = 1,15$ м/хв), температура в точці розгину знижується з 935 до 895 °С. Хімічний склад і температура великого впливу на утворення тріщин не надають.

Ліквация, головним чином, залежить від перегріву сталі вище за температуру ліквідусу. При підвищенні перегріву з 5 до 20 °С ступінь ліквациї по сірці

збільшується з 16 до 60 %. Автори цієї роботи розглядають питання осьових тріщин і ліквації відособлено, тому висновки в деяких випадках суперечливі.

У роботі [20] наводяться результати досліджень хімічної неоднорідності з урахуванням деяких технологічних особливостей при введенні в рідку лунку металу радіоактивного золота Au^{198} на глибину до 6,8 м. Дослідні зразки з широкої і вузької грані послідовно вирізали на верстаті з кроком 0,5-1,0 мм з подальшим хімічним аналізом. На заготовках з маловуглецевої сталі досліджували неоднорідність і структуру. Відзначені дві зони ліквації по перетину – поверхнева (до 25-35 мм) і центральна (3-5 мм). Максимальні відхилення (по відношенню фактичної концентрації до середньої) склали: в поверхневій зоні – 0,85 (вуглець і сірка); в центральній – 2,2 по вуглецю і до 5 по сірці (рис. 1.1). Негативна ліквація біля поверхні сляба більше розвинена у вузької грані, що імовірно зв'язується з дією потоку струменя із стакана. Розвиток центральної ліквації пояснюється характером структури (розвитком зони рівноосних кристалів) і ступенем відображеного потоку від механічної дії на сляб. Рівень впливу останнього оцінювався по величині роздуття на виході із зони роликів. Наголошується також, що при значному роздутті в центральній зоні переважають недендритні равноосні кристали, що утворюються під впливом рідкого потоку, що збагачений домішками. По розподілу ізотопу визначені швидкості потоків уздовж скориночки; в кристалізаторі 0,10-0,40 м/з; потік природної конвекції – 0,01-0,025 м/с; відображений потік (деформація оболонки) – 0,02-0,04 м/с.

У висновках указується на істотний вплив потоків рідкої сталі, на хімічну неоднорідність. Для зниження осьової ліквації рекомендується збільшення зони рівноосних кристалів і зниження роздуття.

У вказаних роботах не розмежований вплив випучування і роздуття оболонки заготовки, не розглянутий в комплексі вплив параметрів розливання на хімічну неоднорідність, а також товщини заготовки, гравітаційних потоків, капілярних сил масопереносу і ін.

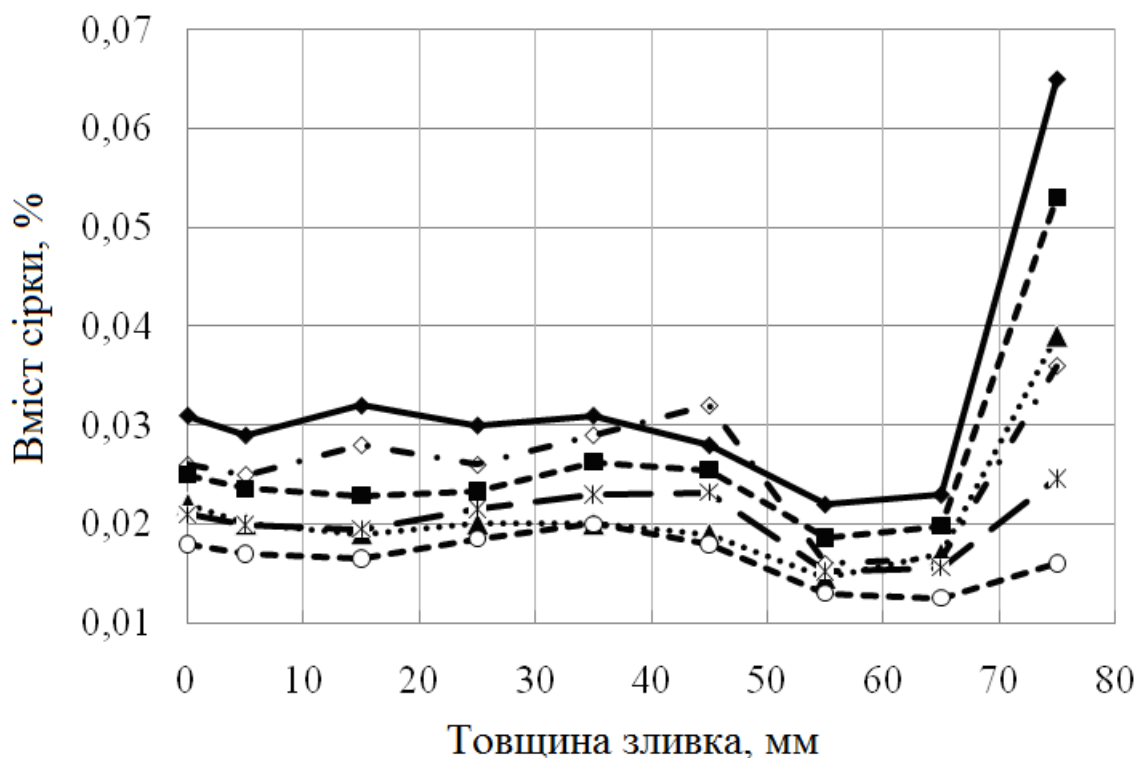


Рисунок 1.1 – Зміна вмісту сірки по товщині безперервнолитої заготовки в залежності від її початкової концентрації

У роботах [21,22] наголошується наявність зовнішньої зони негативної ліквіації до 25 мм і центральної негативної і позитивної ліквіації з індексом 1,4-5,0. Розглядається в основному осьова ліквіація залежно від структури заготовки і зміни геометрії перетину, виникнення «мостів» і перехоплень, при яких утворюються відособлені усадкові мікрораковини. Приводиться аналіз явища випучування і розрахункового прогнозування процесу з урахуванням повзучості, а також характеру руху рідкої фази і зміни концентрації елементів. Швидкість перебігу рідкої фази в гетерогенній зоні на відстані 7,87 м від дзеркала металу (товщина кірки 0,08 м, заготовка з поперечним перетином 0,2 м) визначена рівною 2×10^{-4} м/с.

У вказаних роботах не розглядається механізм хімічної неоднорідності в цілому, а лише окремі його аспекти. Наголошується позитивний вплив збільшення інтенсивності охолодження і деякого обтискання заготовки у витягаючій машині.

У роботі [23] для зниження внутрішньої ліквації рекомендується, навпаки, обмежити охолодження. Відзначається, що в безперервнолитій заготовці може бути ліквація, сумірна з ліквацією в звичному злитку, причому перехід до нижчого або вищого вмісту елементів більш різкий.

Таким чином, з вищенаведене свідчить про те, що результати багатьох проведених досліджень охоплюють окремі аспекти виникнення хімічної неоднорідності і впливу деяких технологічних параметрів на ліквацію [24]. Тому рекомендації часто носять обмежений характер, іноді суперечливі або нереальні.

Слід зазначити, що нерівномірний розподіл хімічних елементів по перетину безперервнолитої заготовки повинен робити значний вплив на напружено-деформований стан металу при подальшій прокатці, збільшуючи або зменшуючи вірогідність утворення дефектів. Існуючі математичні моделі напружено-деформованого стану безперервно-литих заготовок засновані на припущенні рівномірного розподілу хімічних елементів по перетину заготовки, що звужує можливість їх вживання [25-27].

1.3 Вплив неоднорідності заготовки на параметри та результати гарячої прокатки

Відповідно до даних роботи [28] нестационарний процес прокатки на відміну від стаціонарного, сталого, є процес заповнення металом зіву, утвореного валками, і процес викиду металу з валків. При цьому напружено-деформований стан в якій-небудь області осередку деформації в ході заповнення і звільнення металом зіву, утвореного валками, безперервно змінюється.

Як видно з рисунка 1.2, в процесі гарячої прокатки заготовок може відбуватися руйнування заготовки в зоні близької до подовжньої осі заготовки.

Вочевидь таке руйнування обумовлене перш за все наявністю осьової ліквації, проте параметри прокатки також суттєвим чином впливають на утворення даного дефекту.

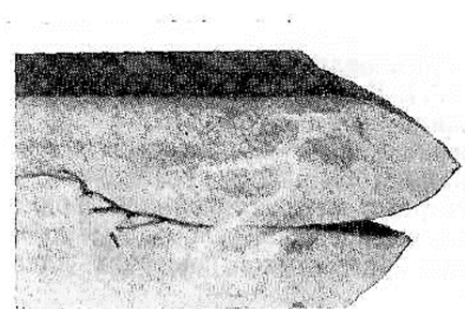


Рисунок 1.2– Торець заготовки після прокатки на блюмінгу [28]

Нерівномірний розподіл хімічних елементів за поперечним перерізом безперервнолитої заготовки апріорі має впливати на напружено-деформований стан металу в процесі прокатки, що призводить до зниження або підвищення ймовірності виникнення дефектів в залежності від технологічних умов реалізації процесу [29].

Незважаючи на велику кількість проведених досліджень і величезний потік інформації, наявних знань недостатньо для надійного управління кристалізацією і процесами утворення ліквацій в безперервнолитій заготовці. Як вказують різні дослідники основними факторами, що впливають на ліквідацію, є швидкість розливання та охолодження заготовки, а також її геометричні розміри. При цьому в залежності від марки сталі, даний вплив може мати суперечливий характер [1,2,23].

В результаті протікання процесу затвердіння ряд хімічних елементів накопичується в осевій зоні зливка, що позначається на фізико-механічні властивості матеріалу в цих зонах. Даний вплив слід вважати негативним, оскільки в цій зоні разом з іншими елементами концентруються сірка і фосфор [28,29]. Широке коло дослідників вказує на те, що збільшення вмісту даних хімічних елементів істотно позначається на здатності металу до деформування.

Отже розвиток математичних моделей має бути спрямований на врахування нерівномірного розподілу хімічних елементів за обсягом заготовки, що сприятиме розширенню можливості їх застосування і збільшенню адекватності отримуваних результатів.

РОЗДІЛ 2 ОПИС СПОСОБУ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальний опис моделі

Розроблена на основі скінченно-елементного методу [30-32] математична модель описує як перехідний, так і сталий стан процесу прокатки слябу. Враховуючи можливість існування великих пластичних деформацій, при описанні області, що деформується, використовували підхід Лагранжа із можливістю (при необхідності) застосування ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) адаптації сітки [31,32], котра дозволяє отримати більш точне рішення при мінімальних затратах машинного часу.

2.1.1 Структура моделі

Модель містить одну четверту симетричну частину описуваного процесу і складається з валка, що не деформується (абсолютно пружний), і бруса, котрий деформується. Сітка бруса складається з C3D8R [32] елементів (рис. 2.1).

Валок моделюється як аналітична циліндрична поверхня, котра не деформується (рис. 2.2).

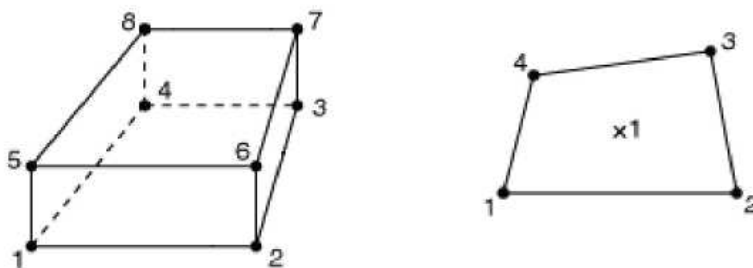


Рисунок 2.1 – Елемент C3D8R зі зредукованою схемою інтегрування $\times 1$ [32]

Симетричні граничні умови накладаються на праву (поверхня при $Z=0$) и нижню (поверхня при $Y=0$) поверхні бруса (рис. 2.3).

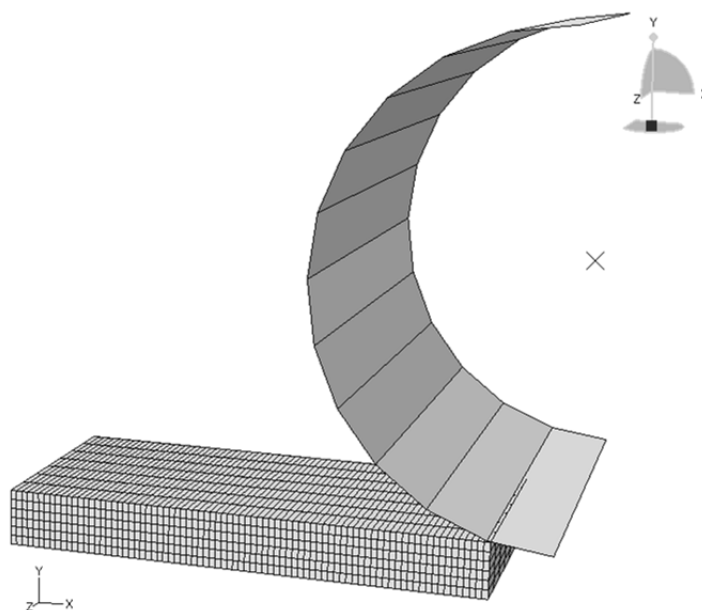


Рисунок 2.2 – Начальна конфігурація сітки моделі

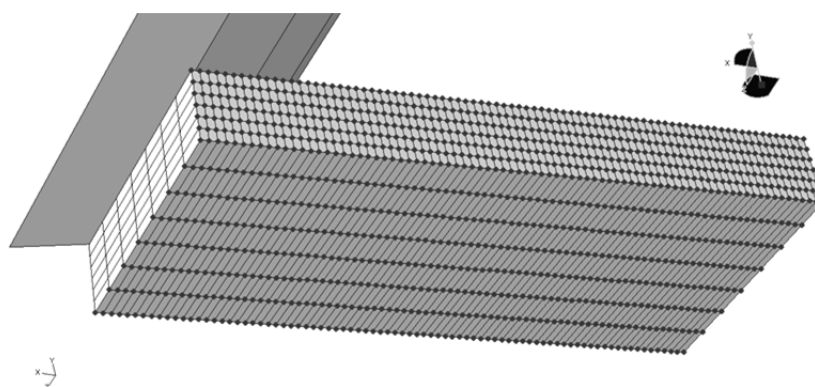


Рисунок 2.3 – Поверхні із симетричними граничними умовами

Тертя поміж контактними поверхнями валка и бруса моделюється законом тертя Кулона. При цьому коефіцієнт тертя є величиною постійною, що характеризує зв'язок між контактним тиском і еквівалентним дотичним (контактним) напруженням.

На вісь циліндра валка накладені обмеження по його переміщенню в усіх трьох площинах і допускається його обертання тільки відносно осі Z . В процесі математичної реалізації процесу валку надається постійна кутова швидкість.

С метою ініціалізації контакту поміж валком и брусом, останньому надається початкова швидкість в напрямку X .

Матеріал бруса моделюється як пружно-пластичний матеріал с ізотропним зміцненням в ізотермічному стані.

В якості фізико-механічних характеристик матеріалу вказані:

- щільність;
- коефіцієнт Пуассона;
- модуль пружності Юнга;
- напруження текучості матеріалу при різних швидкостях деформації;
- криві текучості матеріалу при різних швидкостях деформації.

Окрім того, с метою вивчення впливу неоднорідності хімічного складу по тілу бруса, передбачена можливість використання кривих текучості із урахуванням ліквацій хімічних елементів.

З метою підвищення економічності розрахунків існує можливість використання коефіцієнту масштабу маси всіх елементів бруса.

2.1.2 Оцінка сталого стану процесу

Математичні розрахунки припиняються за умови досягнення сталого стану процесу прокатки, котрий рахується таким за умови, що критерії, що його визначають, досягли своїх сталих значень із встановленою (або прийнятою за умовчанням) точністю.

В якості критеріїв сталого стану використовуються норми [32]:

- еквівалентної пластичної деформації (Норма еквівалентної пластичної деформації – визначається як сума добутків еквівалентної пластичної деформації і об'єму елементу для кожного елементу на площині, поділена на сумарний об'єм елементів на площині і характеризує середньозвішену еквівалентну пластичну деформацію для площини);
- розташування поверхні елементів (Норма розташування поверхні елементів – визначається як найбільший момент інерції перетину площини. При визначенні норми розташування, перетин площини елементів визначається, як проекція сторін елементів, чий первинні нормалі спів-

пали з головним напрямом на площині виходу. При цьому момент інерції визначається щодо центральної точки перетину в напрямках спочатку головних осей перетину);

- сили (Норма сили – визначається як середнє значення сили у вузлі, що належить жорсткому тілу інструмента, що формує, такого як валок, за проміжок часу між контрольними точками. При цьому указується вузол, що належить жорсткому тілу і напрям сили);
- моменту (Норма моменту – визначається як середнє значення моменту у вузлі, що належить жорсткому тілу інструмента, що формує, такого як валок, за проміжок часу між контрольними точками. При цьому указується вузол, що належить жорсткому тілу і напрям моменту).

Площина виходу для кожної норми визначена як площина, що проходить через центр валку, з нормаллю до площини співпадаючого з напрямом прокатки.

2.1.3 Зредуковане інтегрування

Перевага зредукованого інтегрування полягає в тому, що деформації і напруження обчислюються в точках, які забезпечують оптимальну точність, так звані точки Barlow [32]. Другою перевагою зредукованого числа точок інтегрування полягає в зменшенні CPU часу і вимог пам'яті. Недоліком процедури зредукованої інтегрування є можливість появи деформованого стану, коли деформації в точках інтегрування відсутні. При цьому способи нульової енергії роблять елемент незначущим по рангу і викликають феномен званий hourglassing (пісочний годинник), де нульовий енергетичний спосіб починає розповсюджуватися через сітку, що призводить до погіршень в рішенні. Ця проблема є особливо серйозною для чотирикутних і шестигранних елементів першого порядку. Для того, щоб попередити надмірні деформації на елемент накладається додаткове штучне обмеження. У цій, так званий, hourglass процедурі, що управляє, штучне обмеження пов'язане із способами нульової енергетичної деформа-

ції. Дана процедура використовується в Abaqus для багатьох твердих елементів і оболонок.

2.2 Формулювання ALE

Довільне формулювання Лагранжа–Ейлера (ALE) – це комбінація описів Лагранжа і Ейлера [31,32]. При такому формулюванні система відліку не повинна слідувати за переміщенням матеріалу (формулювання Лагранжа) або залишатися нерухомою (формулювання Ейлера), а є незалежною від переміщення матеріалу. Це формулювання було вперше застосоване в методі скінченного елемента при розрахунках взаємодії рідкої структури і пізніше в процесах формоутворення. Формулювання ALE можна використовувати, при вирішенні проблеми з вільними поверхнями у формулюванні Ейлера або для виключення спотворень сітки у формулюванні Лагранжа.

Різниця між симуляціями з формулюванням ALE і для формулювання Лагранжа з оновленням (перестроювання) сітки для процесу осаджування показана на рисунку 2.4. Як можна бачити симуляція для формулювання Лагранжа з оновленням сітки (з лівого боку) не може продовжуватися, оскільки елементи дуже спотворені, крім того, не точно описані граничні умови (розширення вм'ятини). Коли та ж симуляція, виконана з формулюванням ALE, (права половина), може бути продовжена, оскільки дозволяє зберегти форму елементів і краще описати граничні умови.

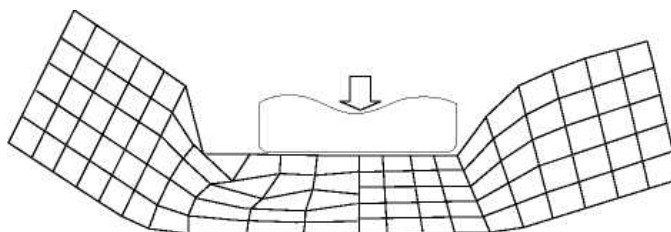


Рисунок 2.4 – Симуляція процесу осадження: зліва симуляція для формулювання Лагранжа з оновленням сітки, справа – з формулюванням ALE.

Особливістю формулювання ALE є те, що топологія сітки (число елементів і їх взаємозв'язок) постійна впродовж всієї симуляції.

Метод ALE також може використовуватися, щоб моделювати розповсюдження тріщини. Приріст спочатку існуючої тріщини може здійснюватися до певного етапу без зміни топології сітки.

2.3 Модель тертя Кулона

У основі концепції моделі тертя Кулона лежить відношення максимально можливого напруження тертя (дотичного) до зовнішнього контактного тиску між контактуючими тілами [31,32]. У основній формі моделі тертя Кулона два контактуючі тіла можуть випробовувати дотичне напруження на їх поверхнях до величини відповідній початку ковзання один щодо одного, цей стан називається – зчеплення (склеювання). Модель тертя Кулона визначає критичне дотичне напруження – τ_{crit} , при якому починається ковзання між поверхнями, як частина контактного тиску p між поверхнями, через коефіцієнт тертя μ ($\tau_{crit} = \mu \cdot p$).

Враховуючи, що для 3D моделей дотичне напруження складається з двох компонент – подовжнього τ_1 і поперечного τ_2 , то еквівалентне дотичне напруження визначається, як $\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$.

Величина критичного контактного напруження τ_{crit} в моделі тертя Кулона, при якому відбувається перехід від зчеплення до ковзання і назад, за умовчанням представляється у вигляді графічної залежності між контактним тиском і еквівалентним контактним напруженням, як показано на рисунку 2.5.

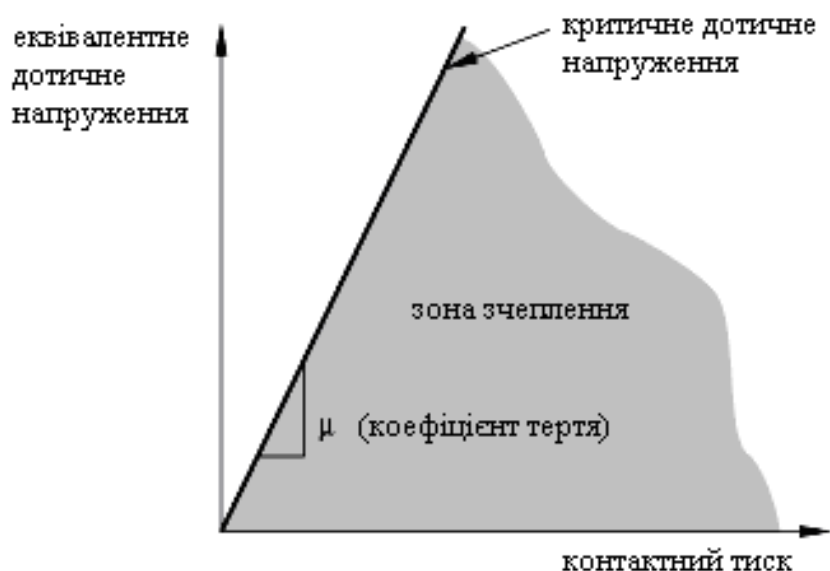


Рисунок 2.5 – Величина критичного контактного напруження

2.4 Моделювання можливих пошкоджень

2.4.1 Моделі пошкодження

Моделі пошкодження використовуються, щоб описати зміну властивостей матеріалу, які ведуть до початку руйнування.

Ці моделі можна розділити на два типи [31,32]:

- залежні моделі пошкодження – пошкодження представлене у вигляді конструктивних співвідношень, які ведуть до перерозподілу полів напруження і деформації, коли розвивається пошкодження;
- незалежні моделі пошкодження – пошкодження обчислюється з полів напруження і деформації, але не змінює ці поля.

Для оцінки можливості пошкоджень в даній роботі використовували незалежні моделі пошкодження.

2.4.2 Діаграми руйнування

Незалежний підхід використовує діаграми руйнування. Діаграма руйнування дає відношення між еквівалентною пластичною деформацією руйнування $\bar{\epsilon}_f^p$ і показником напруженого стану *triax*, визначається як гідростатичне напруження σ_h , поділена на еквівалентне напруження Мізеса σ_{eq} :

$$triax = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} \quad (2.1)$$

Типова форма такої кривої показана на рисунку 2.6. Деформація руйнування зростає при негативних triaxiality співвідношеннях і зменшується з їх збільшенням. Діаграму руйнування можна отримати експериментально з різними умовами навантаження [32].

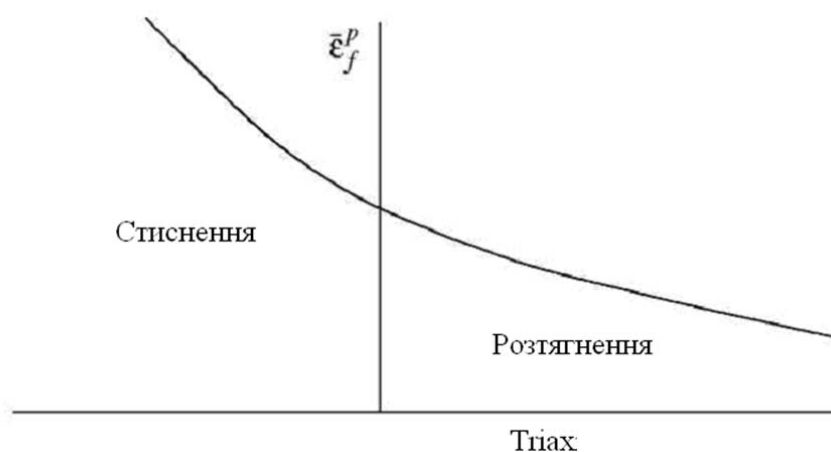


Рисунок 2.6 – Діаграма руйнування (Крива в'язкості)

Погрішність діаграм руйнування полягає в тому, що напруження і шлях деформації процесу зазвичай відрізняються від напруження і шляху деформації в експериментах, використовуваних, для отримання діаграми руйнування.

2.4.3 Критерії руйнування

Критерії руйнування засновані на припущенні, що протягом пластичної деформації розвиваються пошкодження, які ведуть до початку руйнування. Пошкодження D обчислюється як інтеграл функції напруження і історії деформації. Початок руйнування відбувається, коли пошкодження досягає критичного рівня D_c .

$$\begin{aligned} D &= \int_0^{\bar{\varepsilon}^p} f(\boldsymbol{\sigma}, \dots) d\bar{\varepsilon}^p; \\ D &= D_c \quad \text{при} \quad \bar{\varepsilon}^p = \bar{\varepsilon}_f^p. \end{aligned} \tag{2.2}$$

Привабливим методом, при вимірюванні критичного значення пошкодження, є використання випробувань на розтягування.

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ

В ході моделювання необхідно було отримати рішення, за наслідками якого можна було б оцінити напружено-деформований стан сляба після прокатки.

3.1 Параметри моделювання

3.1.1 Властивості матеріалу

Як модельований матеріал застосовували сталь 17Г1С з хімічним складом, представленим в таблиці 3.1. При цьому розподіл хімічних елементів за всім обсягом бруса передбачався рівномірним.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад стали 17Г1С

Вміст елементів %									
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	N	As
0.15...0.20	0.4...0.6	1.15...1.6	0.3	0.3	0.3	0.035	0.040	0.008	0.08

Основні фізико-механичні властивості матеріалу:

- щільність – $7,8 \text{ т/м}^3$;
- модуль пружності – 70600 МПа ;
- коефіцієнт Пуассона – $0,3$;
- температура – 1200°C .

Напруження текучості матеріалу при різній швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$ залежно від величини пластичної деформації ε представлена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Пластичні властивості матеріалу

ε	Напруження текучості матеріалу, МПа				
	$\dot{\varepsilon}=0,01$	$\dot{\varepsilon}=1$	$\dot{\varepsilon}=5$	$\dot{\varepsilon}=10$	$\dot{\varepsilon}=20$
0	15.58	28.63	35.4	38.8	42.5
0.03	19	32.61	40.34	44.2	48.44
0.075	21.09	38.74	47.92	52.51	57.54
0.149	24.03	44.14	54.58	59.82	65.55
0.224	25.93	47.63	58.91	64.56	70.74
0.298	27.38	50.28	62.17	68.14	74.67
0.373	28.55	52.44	64.85	71.06	77.87
0.448	29.54	54.26	67.11	73.54	80.59
0.522	30.41	55.86	69.08	75.7	82.96
0.597	31.19	57.28	70.84	77.63	85.06
0.672	31.88	58.56	72.43	79.37	86.97
0.747	32.52	59.73	73.88	80.95	88.71
0.895	33.66	61.82	76.45	83.78	91.8

3.1.2 Початкові умови

Початкова товщина заготовки, що прокатується, складає 230 мм при ширині 900 мм. Діаметр валка 1000 мм. Кутова швидкість обертання валка – 8 c^{-1} . Початкова швидкість руху заготовки – 4 м/с. Коефіцієнт тертя $\mu = 0,4$. Моделювали режим обтискання 30 мм.

3.2 Результати моделювання

3.2.1 Сталий стан

Як указувалося вище, завершення обчислювального процесу настає при досягненні сталого стану процесу. Деформована сітка, яка досягла сталого стану процесу представлена на рисунку 3.1.

Залежності зміни критеріїв що характеризують сталий стан процесу представлені на рисунку 3.2.

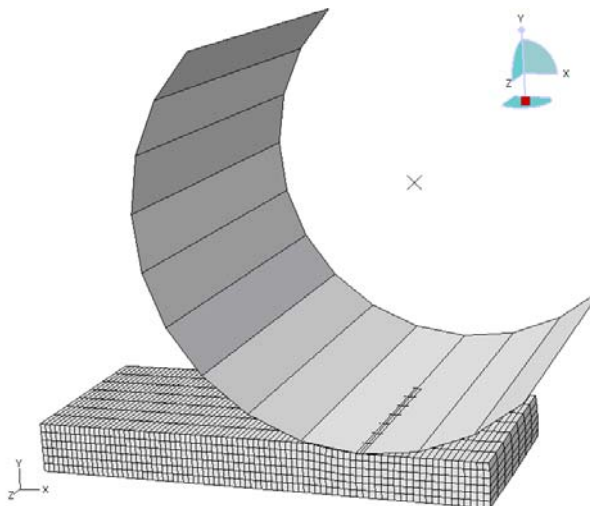


Рисунок 3.1 – Деформована сітка по досягненні сталого стану процесу для режиму обтискання 30 мм

Як критерії сталого стану використовувалися норми:

- еквівалентної пластичної деформації (див. рис. 3.2 а);
- розташування поверхні елементів (див. рис. 3.2 б);
- сили (див. рис. 3.2 в);
- моменту (див. рис. 3.2 г).

Як можна бачити з представлених залежностей і з аналізу отриманих результатів сталий стан досягається на $\approx 0,0931$ с протікання процесу прокатки. Процес обчислень припиняється на $\approx 0,095$ с протікання процесу прокатки.

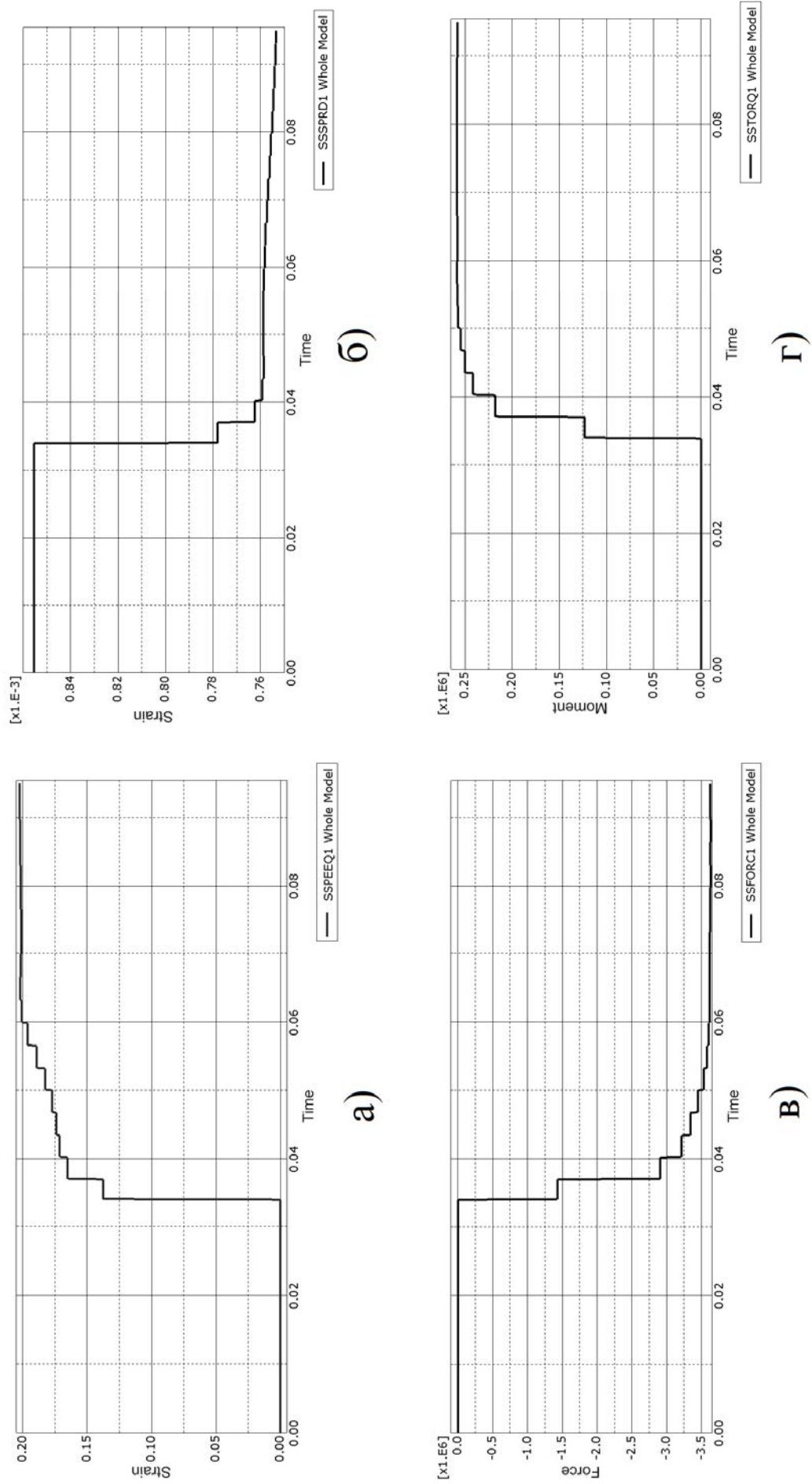


Рисунок 3.2 – Залежності зміни критеріїв, що характеризують сталий стан процесу

3.2.2 Напружено-деформований стан слябу при сталому процесі прокатки

Враховуючи розглянуту вище модель можливих пошкоджень, як основні показники напружено-деформованого стану слябу в процесі прокатки були вибрані еквівалентна пластична деформація і triaxiality співвідношення (рисунки 3.3 і 3.4).

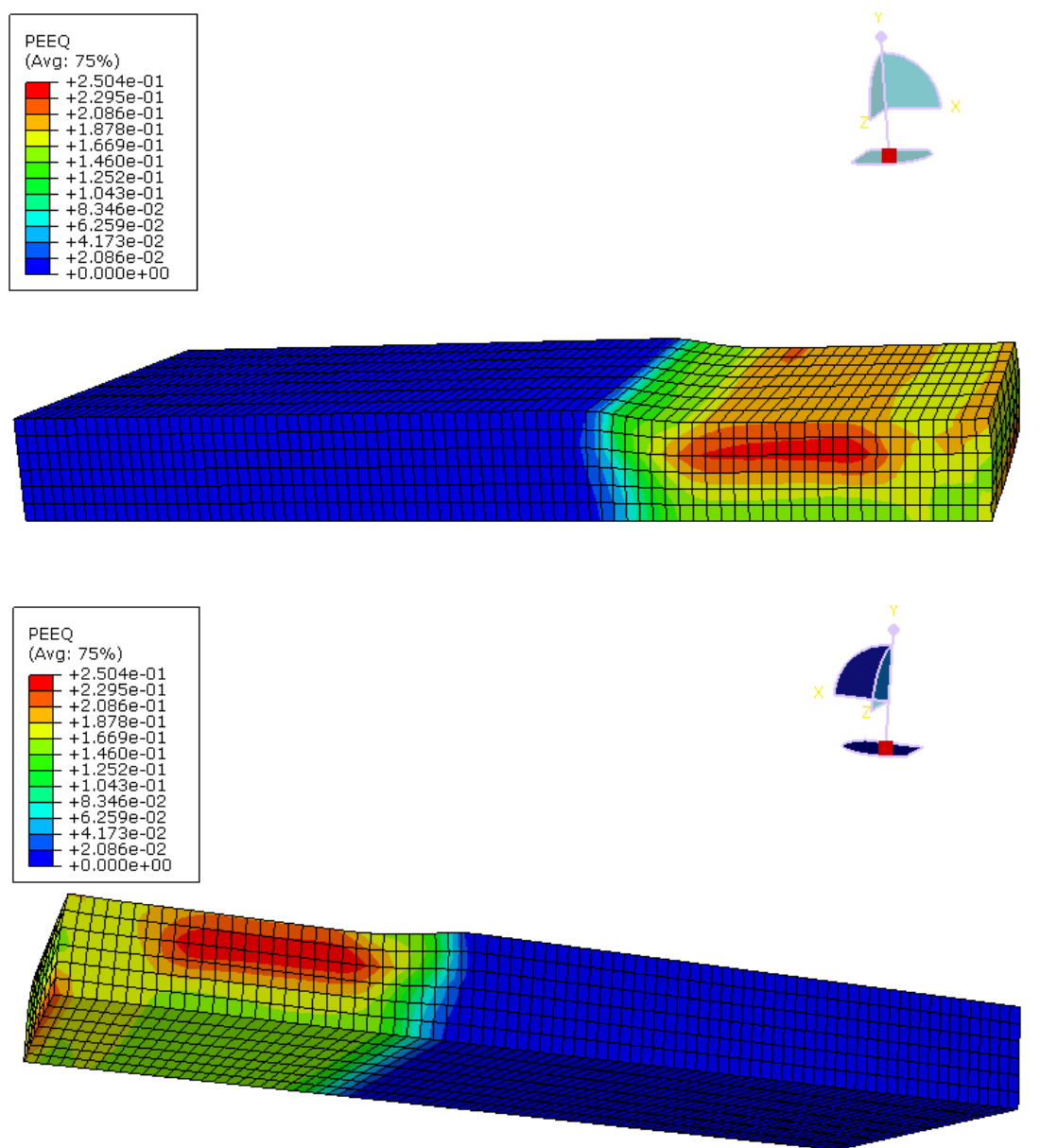


Рисунок 3.3 – Розподіл еквівалентної пластичної деформації при досягненні сталого стану

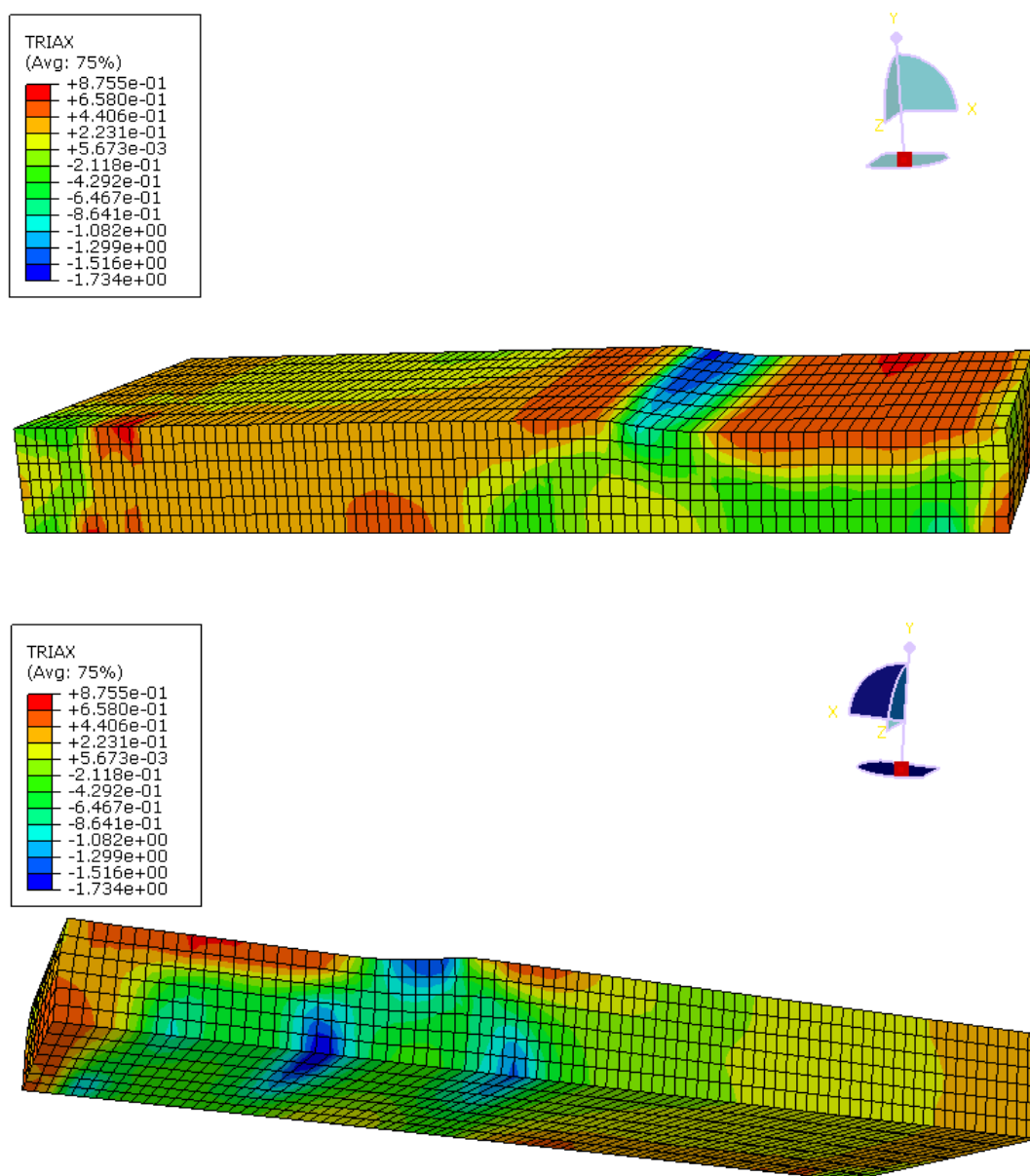


Рисунок 3.4 – Розподіл triax співвідношень при досягненні сталого стану

Враховуючи той факт, що гідростатичний тиск, який використовується при визначенні triaxiality співвідношень (див. (2.1)), визначається з виразу:

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = -\sigma_h, \quad (3.1)$$

то можна відзначити, що навіть невеликі величини напруження $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ можуть давати великі величини triaxiality співвідношень, тому у якості оцінки

істотності впливу даних співвідношень додатковим критерієм було вибрано еквівалентне напруження Мізеса, яке представлено на рисунку 3.5.

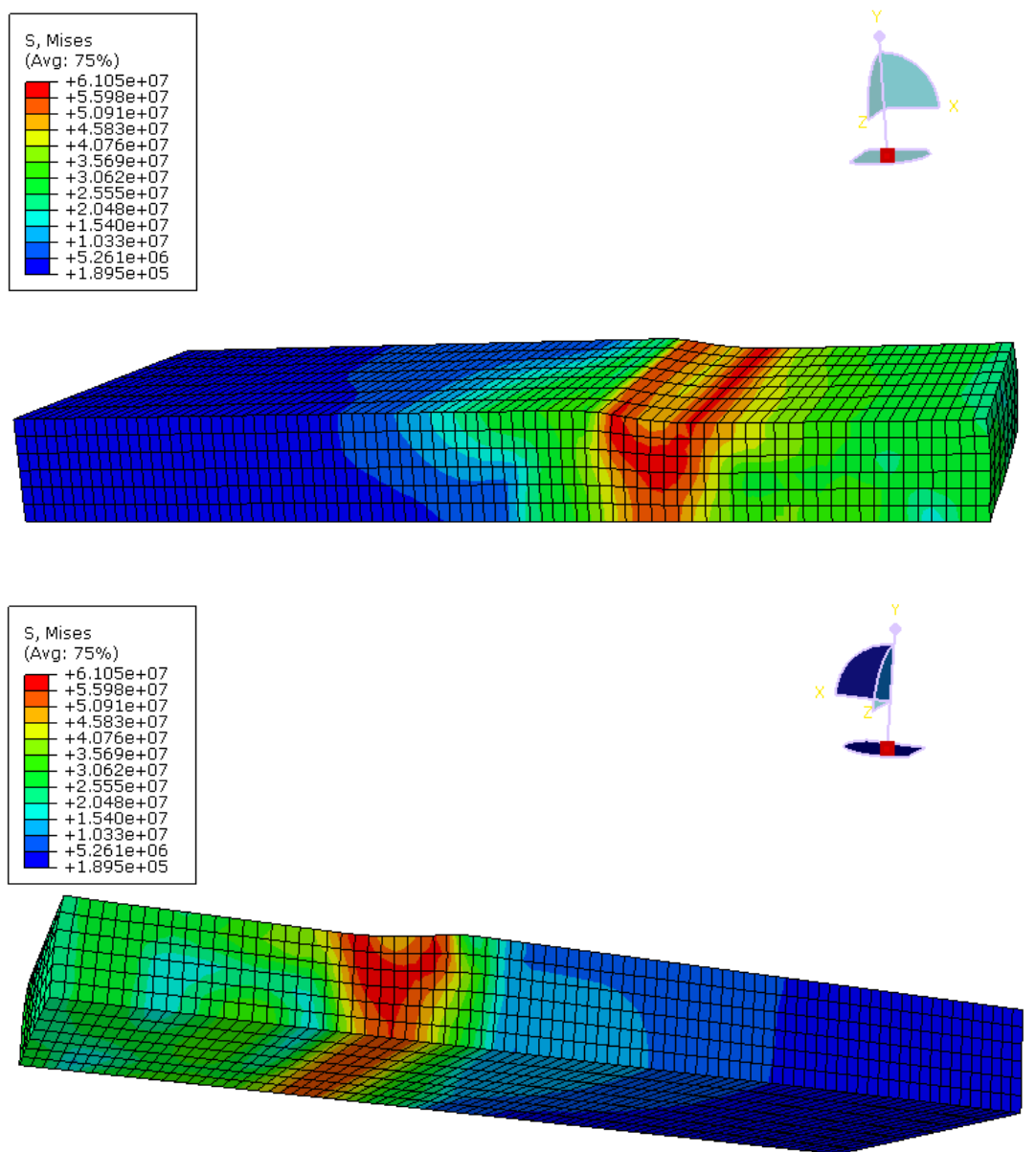


Рисунок 3.5 – Розподіл еквівалентного напруження Мізеса при досягненні сталого стану

З метою оцінки напрямку розвитку дефектів і їх характеру були отримані розподіли головних $(\sigma_x = S_{11}, \sigma_y = S_{22}, \sigma_{33} = S_{33})$ і дотичних $(\tau_{xy} = \tau_{yx} = S_{12}, \tau_{xz} = \tau_{zx} = S_{13}, \tau_{yz} = \tau_{zy} = S_{23})$ напружень, які представлені на рисунках 3.6–3.11.

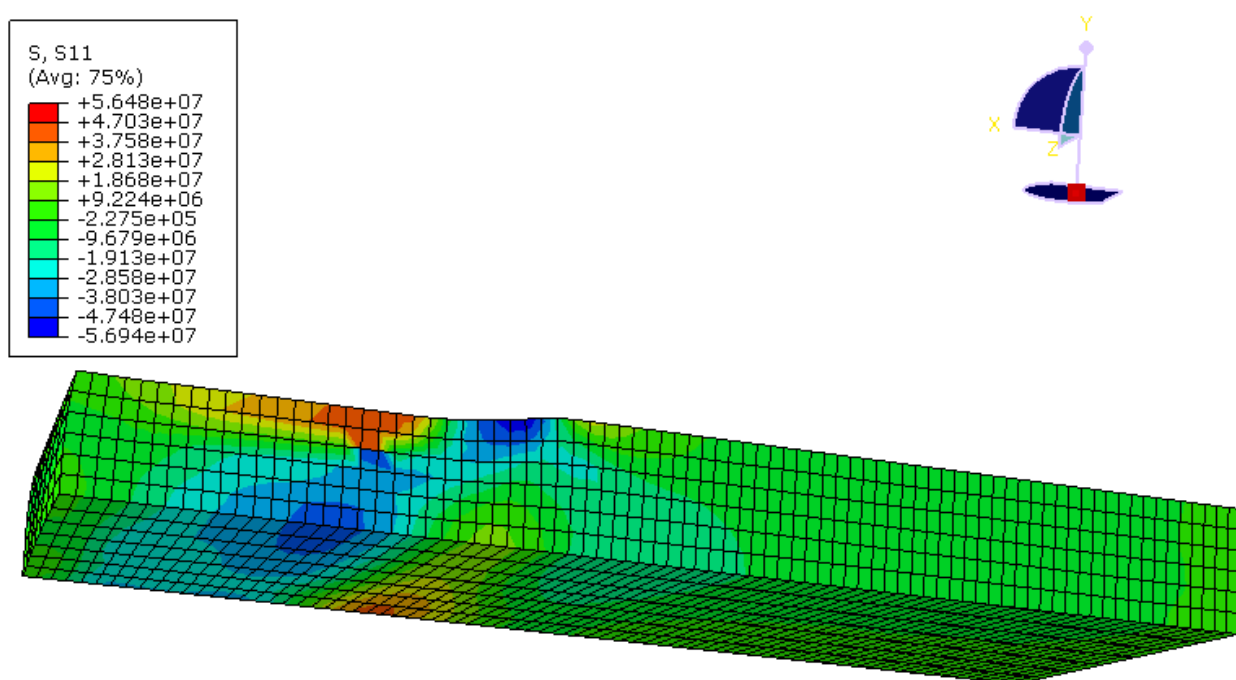
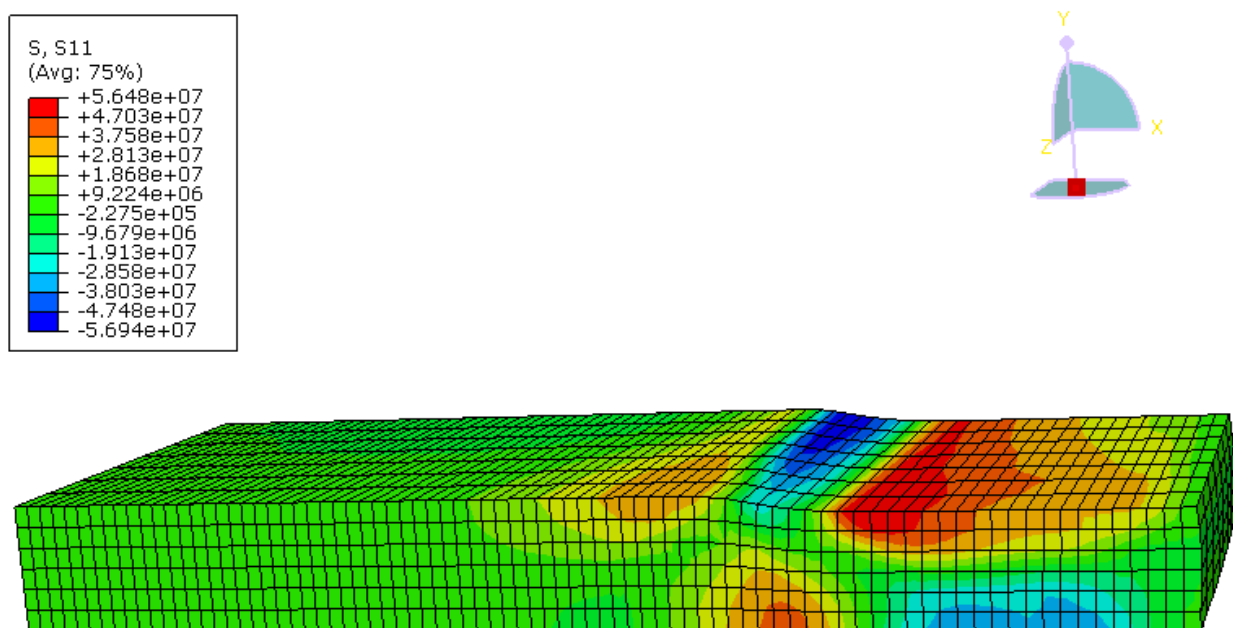


Рисунок 3.6 – Розподіл напруження σ_x при досягненні сталого ста-
ну

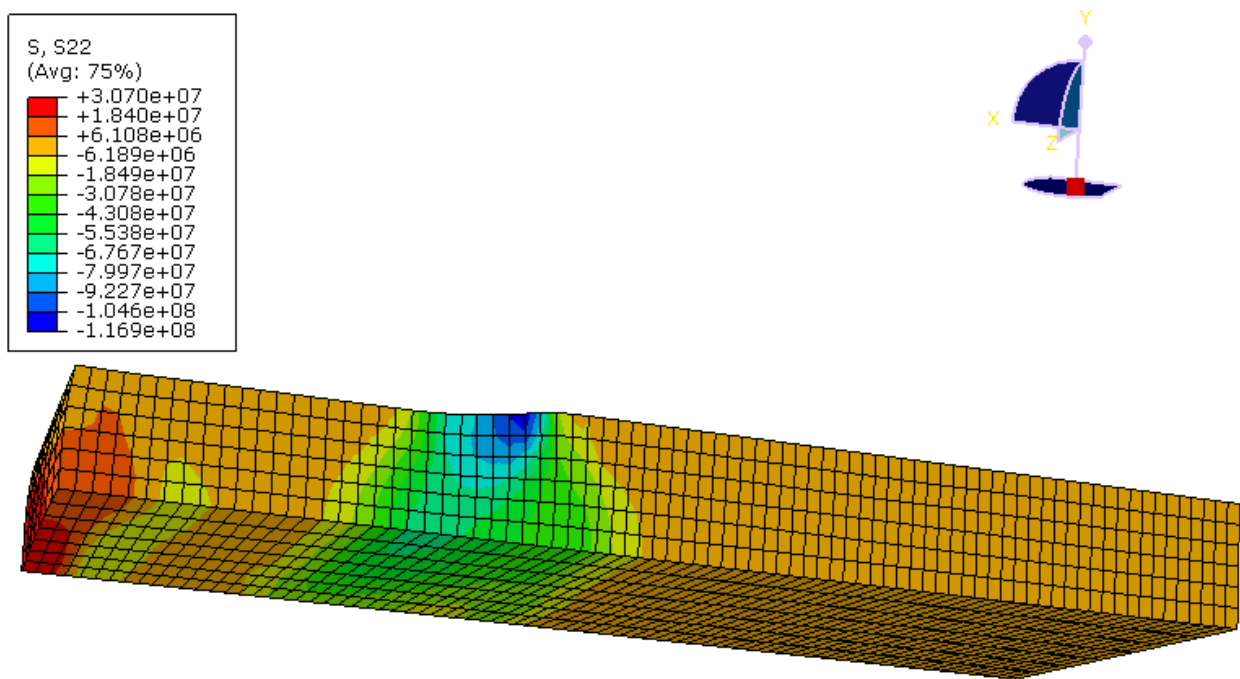
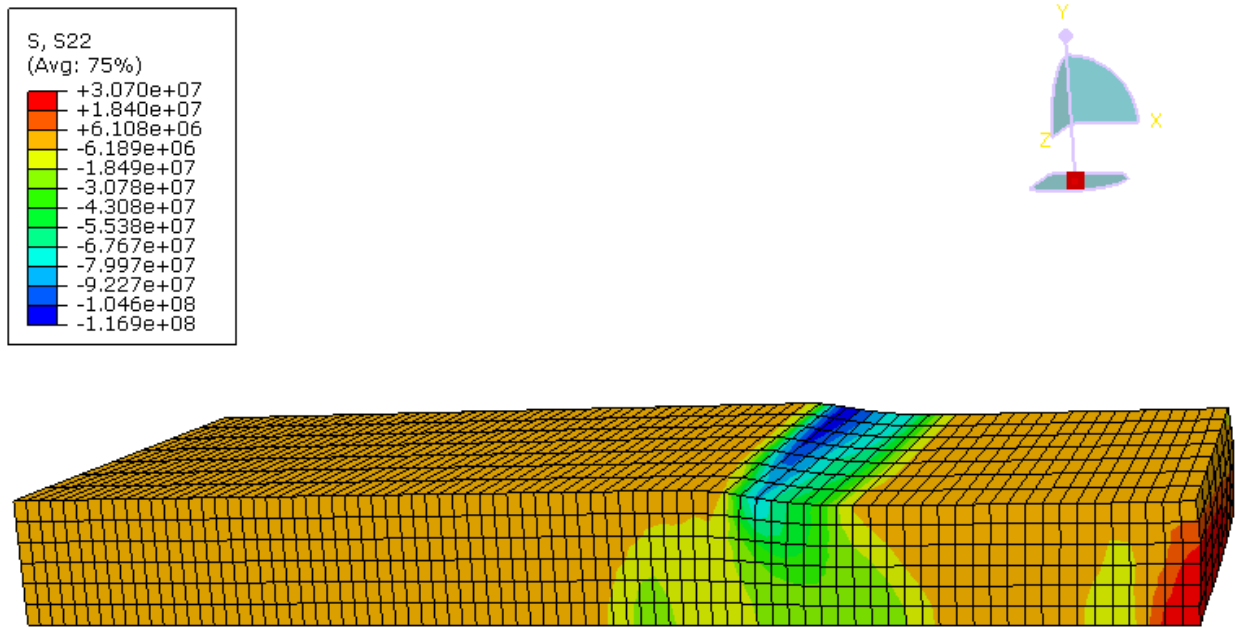


Рисунок 3.7 – Розподіл напруження σ_y при досягненні сталого стану

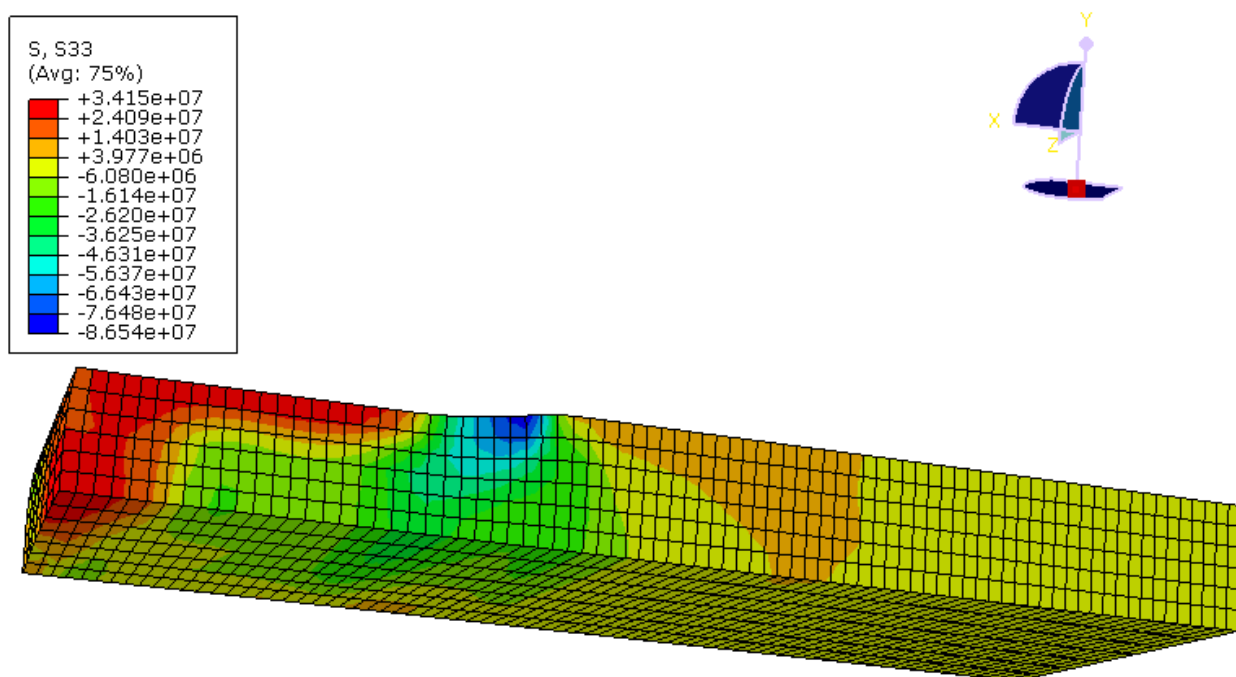
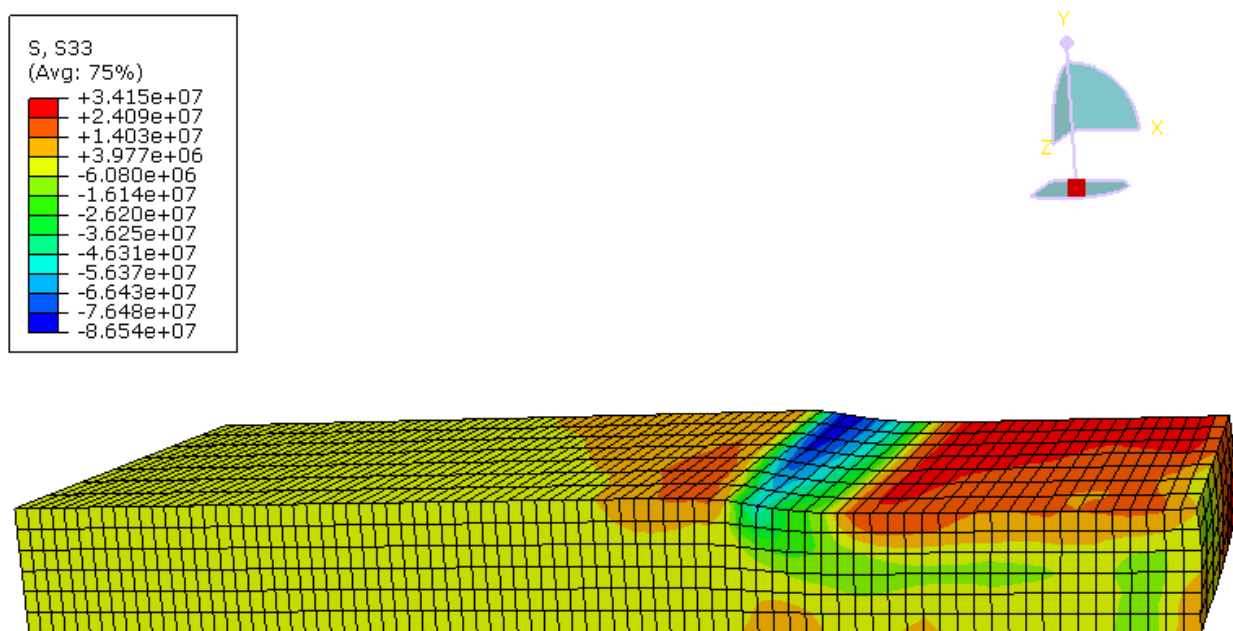


Рисунок 3.8 – Розподіл напруження σ_z при досягненні сталого ста-
ну

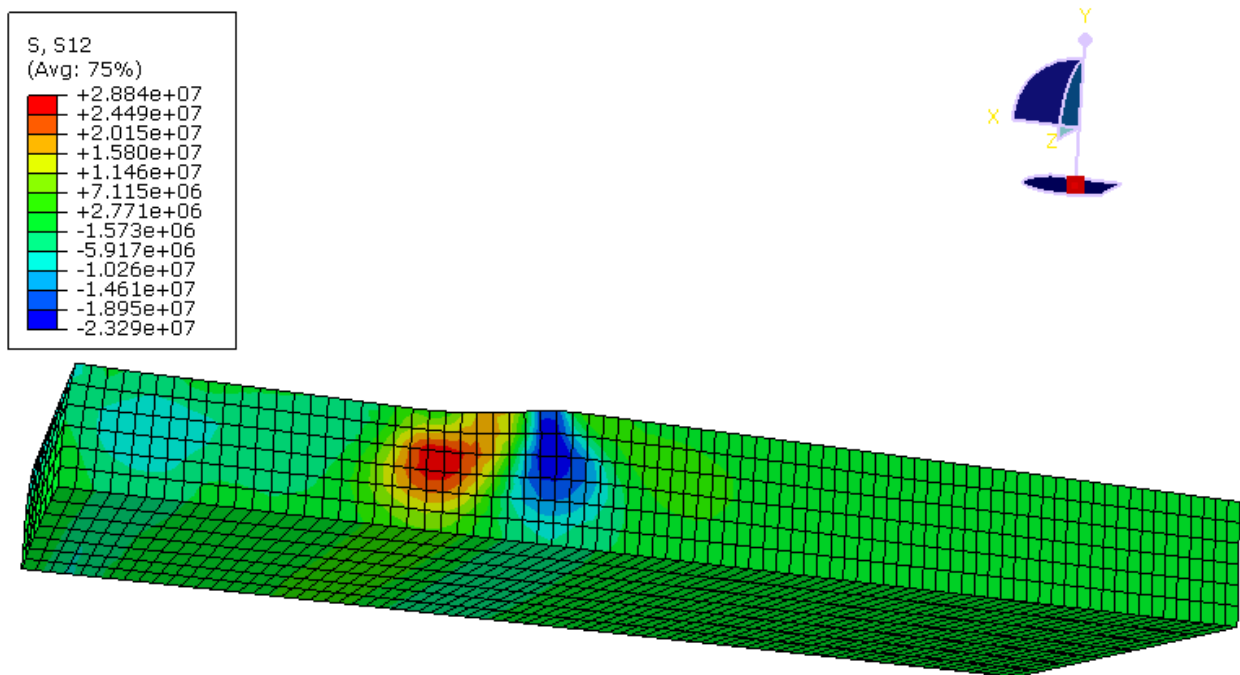
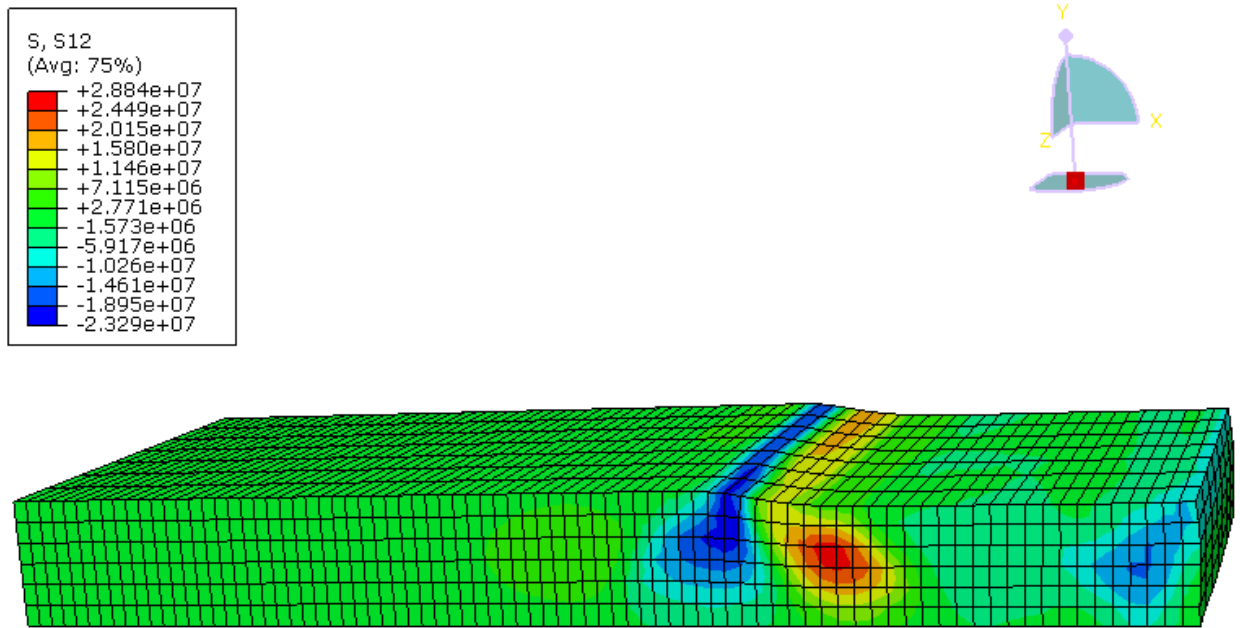


Рисунок 3.9 – Розподіл напруження τ_{xy} при досягненні сталого стану

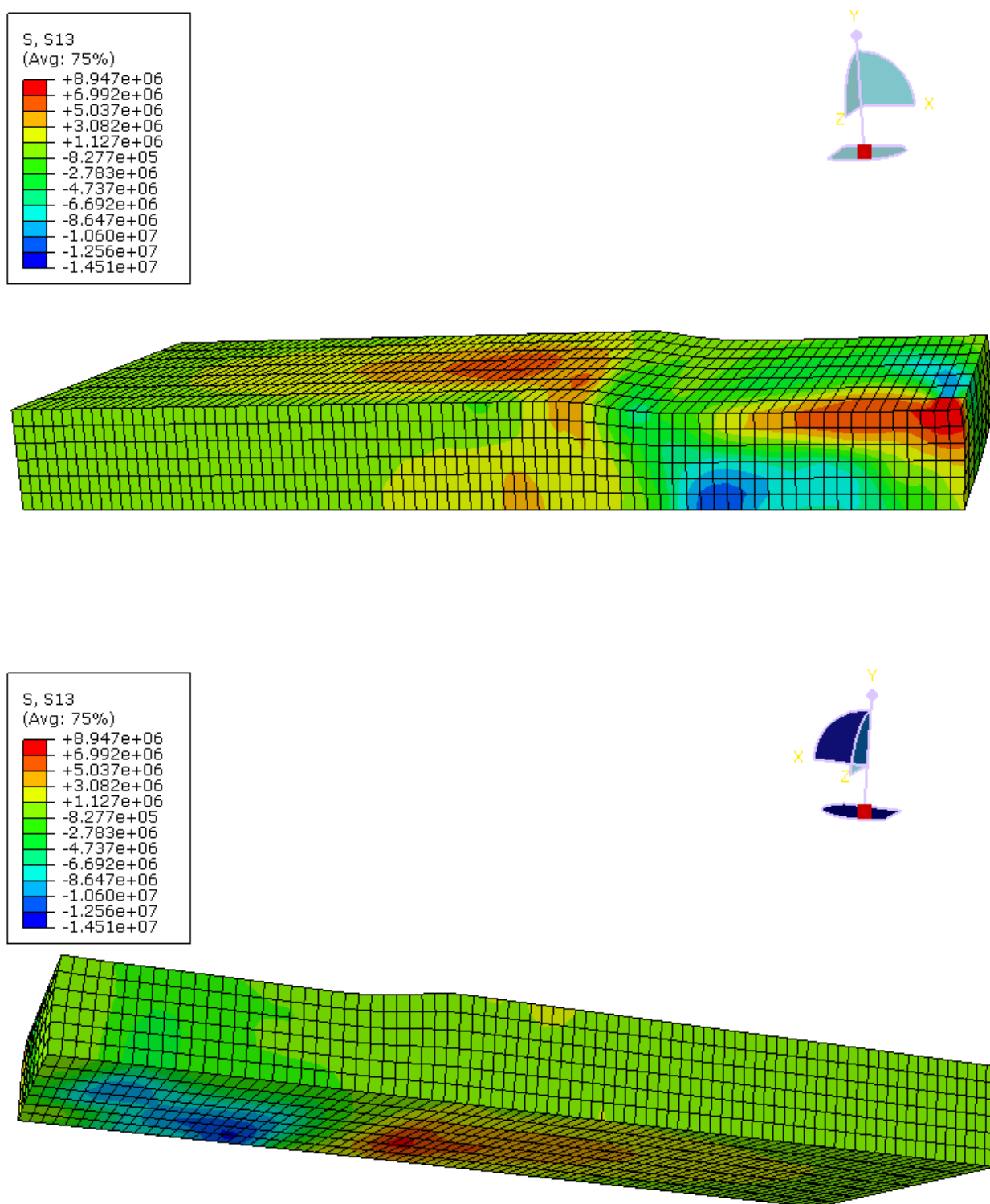


Рисунок 3.10 – Розподіл напруження τ_{xz} при досягненні сталого стану

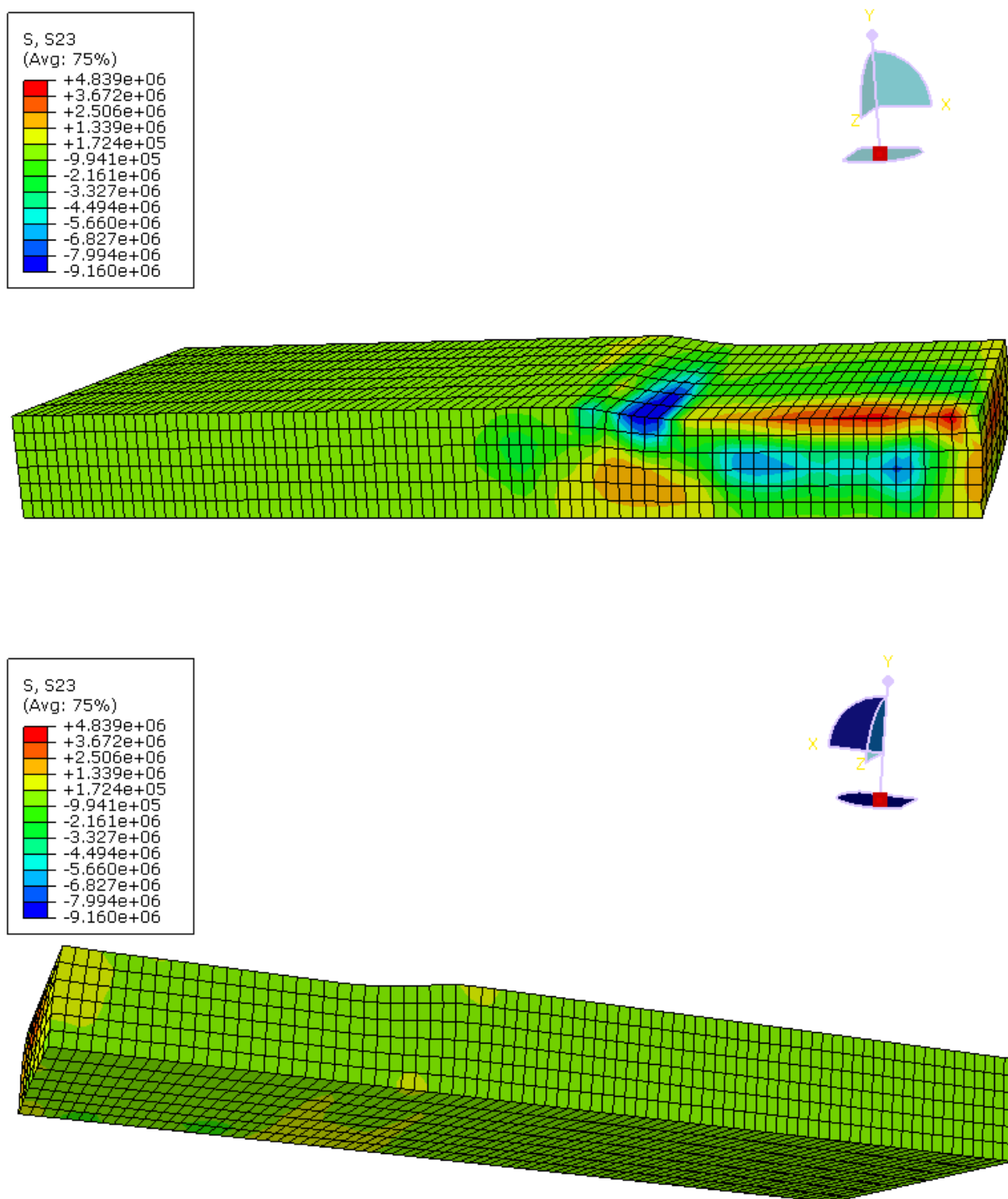


Рисунок 3.11 – Розподіл напруження τ_{xz} при досягненні сталого стану

РОЗДІЛ 4 РОЗВИТОК МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ТВЕРДІННЯ

Враховуючи особливості процесу твердіння (див. розділ 1), математична модель представлена в розділі 3 вимагає внесення ряду коректив з метою розширення її можливостей при прогнозуванні виникнення дефектів в процесі гарячого прокати безперервнолитих слябів.

Таким чином, в першу чергу, необхідно враховувати вплив неоднорідності хімічного складу сляба на зміну механічних властивостей по перетину безперервнолитої заготовки в процесі деформації. При цьому для визначення механічних властивостей матеріалу, можна використовувати відомі аналітичні залежності Андреюка-Тюленева [33] або експериментальні дані

Крім того, слід зазначити, що основною проблемою на шляху створення моделей, що враховують вплив ліквацій в безперервнолитому злитку на використання ресурсу пластичності при прокатці, є вельми обмежена інформація щодо міцністних властивостей матеріалів в області температур гарячої прокати.

В цілому процес прокати можна розділити на два етапи – стаціонарний (сталій) або нестаціонарний (несталій). Нестаціонарний процес прокати на відміну від стаціонарного, спостерігається в процесі заповнення металом зіву, утвореного валками, і в процесі викиду металу з валків. При цьому напружено-деформований стан в якій-небудь області осередку деформації в ході заповнення і звільнення металом зіву, утвореного валками, безперервно змінюється.

Враховуючи, що по висоті сляба зона ліквацій складає $\approx 3\%$ (рис. 4.1), то дискретизація всього бруса скінченими елементами однакового розміру є недоцільною з ряду причин:

- 1) при розмірі всіх елементів заввишки більш за товщину зони ліквацій оцінити їх вплив на напружено-деформований стан не представляється можливим;

2) при розмірі всіх елементів заввишки менш товщина зони лікваций значно зростає загальне число елементів і як наслідок число вирішуваних рівнянь.

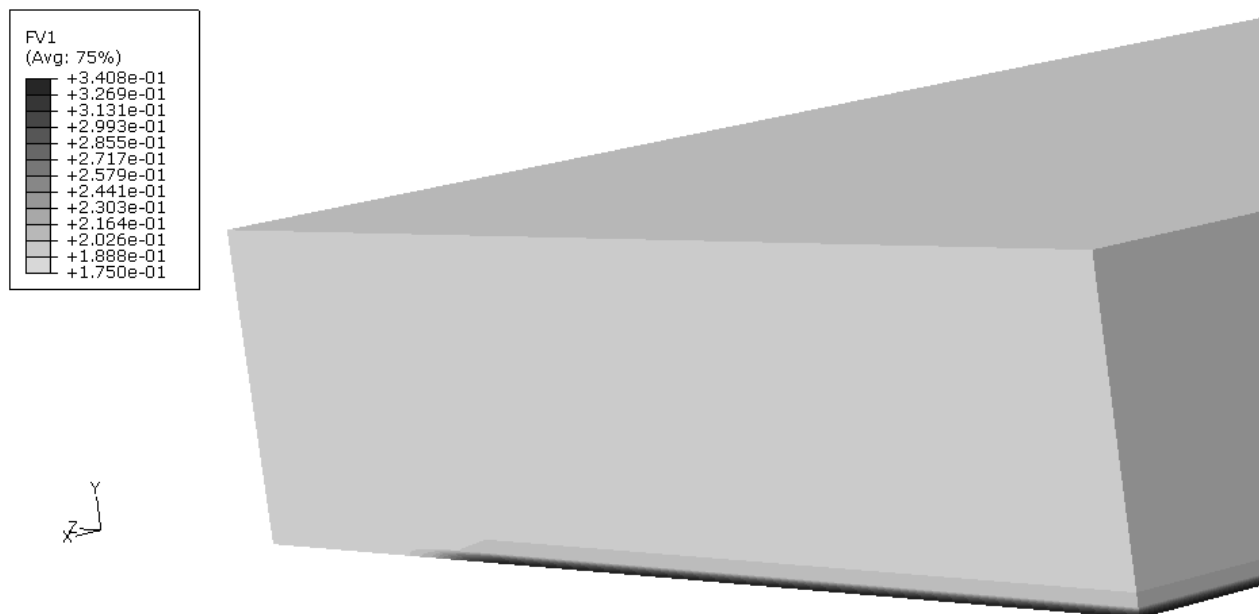


Рисунок 4.1 – Приклад початкового поля розподілу вуглецю в безперервнолитій заготовці із сталі 17Г1С

У даній ситуації є логічним згущувати елементи по висоті в зоні лікваций і декілька зменшити висоту елементів в зоні, де лікваций відсутні (Рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Приклад початкової сітки бруса у разі наявності лікваций

Необхідність дослідження несталого стану, також вказала на ряд особливостей побудови сітки по довжині бруса:

1) при рівній довжині всіх елементів бруса, ситуація подібна описаній вище: або значно знижується точність розрахунків, або швидко росте число рівнянь;

2) згущування сітки тільки в зоні несталого процесу дещо покращує ситуацію, проте об'єми обчислень залишаються достатньо великими.

З погляду забезпечення достатньої точності обчислень і зниження часу вирішення доцільним є ділення бруса по довжині на три зони (рис. 4.3): I – досліджувана зона несталого руху; II – зона, де досягається сталий стан; III – частина бруса, що залишилася.

Рисунок 4.3 – Приклад початкової сітки бруса при моделюванні перехідного процесу

При цьому слід вказати ще на одну особливість моделювання несталого стану. Дроблення сітки в зоні несталого стану по довжині і по висоті пов'язано з дробленням сітки в зоні ліквідації. Неузгоджене дроблення сітки приводить до появи помилкових коливань напружень в тілі бруса (рис. 4.4).

а)

б)

Рисунок 4.4 – Приклад помилкових коливань напруги в тілі бруса:

а – еквівалентних напружень по Мізесу;

б – показник напруженого стану

Необхідно відмітити, що вірогідність виникнення даних коливань, при незмінній довжині елементів в зоні несталого стану, може бути знижена за рахунок достатнього зменшення висоти елементів в зоні відсутності лікваций.

Крім того, слід відзначити, що при оцінці вірогідності виникнення дефектів, обумовлених умовами деформації з урахуванням наявності лікваций, необхідні експериментальні дослідження для отримання кривих деформаційного руйнування з урахуванням хімічного складу, оскільки інформація в цій області знань вельми обмежена.

РОЗДІЛ 5 ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

В ході виконаної роботи був проведений аналіз особливостей процесу твердіння безперервнолитого сляба, що дозволило встановити ряд факторів що впливають на напружено-деформований стан сляба при гарячій прокатці і, як наслідок, сприяють підвищенню вірогідності виникнення дефектів при прокатці:

1. У вузькій осьовій зоні безперервнолитого сляба, як правило, спостерігається більш менш яскраво виражена позитивна ліквация (індекс ліквациї від 1,3 до 4,5), безпосередньо перед якою розташована зона, збіднена домішками. Аналіз ліквациї в центрі злитка і на периферії показує, що осьова частина має значно більший індекс ліквациї. Ширина осьової ліквациї складає до 3% від товщини сляба;
2. За певних умов в злитках безперервного розливання прямокутного перетину з великим співвідношенням сторін хімічна неоднорідність може мати значний розвиток і вміст ліквуючих домішок в осьовій зоні перевищує марочний показник в 1,3...1,7 разу, а вміст сірки і фосфору може бути значно вище за цей показник. Механічні випробування стандартних зразків, вирізаних з осьової зони листів уздовж напрямку прокатки, показали, зниження межі міцності до 16,7 %, межі текучості до 28 %, ударної в'язкості до 13,8 %;
3. Підвищення температури металу викликає посилення ліквациї на 40...45% по фосфору і сірці, а по вуглецю на 30 %. Ліквация, головним чином, залежить від перегріву сталі вище за температури ліквідуса. При підвищенні перегріву з 5 до 20°C ступінь ліквациї по сірці збільшується з 16 до 60 %;
4. Крім того, можна відзначити, що збільшення інтенсивності охолодження, м'яке обтискання заготовки у тягнуче-правильний машині сприяє зниженню ступеня ліквациї, а нерівномірне вторинне охолодження викликає утворення ліквацийних смуг;

5. З підвищенням швидкості розливання в інтервалі 0,3 – 0,55 м/хв осьова ліквация зростає на 30 % для всіх марок сталі. При розливанні вуглецевої сталі з підвищенням швидкості осьова ліквация знижується, а при розливанні сталі марок 20X, 40X – зростає. Збільшення товщини злитка в діапазоні від 150 мм до 200 мм веде до посилення осьової ліквации на 0,4 – 1,5 балу.

На базі даних результатів була розроблена скінченно-елементна математична модель, що враховує вплив осьових лікваций в безперервнолитому слябі на процесі гарячої прокатки і що дозволяє оцінити вірогідність виникнення дефектів при прокатці.

В ході розробки математичної моделі був виявлений ряд особливостей моделювання процесу гарячої прокатки сляба з урахуванням осьових лікваций, які можуть бути рекомендовані до використання при розробці математичних моделей, що враховують особливості процесу твердіння безперервнолитого злитка:

1. Для врахування впливу осьових лікваций необхідне згущування скінчених елементів по висоті в зоні лікваций і невелике зменшення висоти елементів в зоні, де ліквации відсутні;
2. Для забезпечення достатньої точності обчислень і зниження часу рішення доцільним є ділення бруса по довжині на три зони: I – досліджувана зона несталого руху; II – зона, де досягається сталий стан; III – частина бруса, що залишилася;
3. Дроблення сітки в зоні несталого стану по довжині і по висоті повинно бути узгоджено з дробленням сітки в зоні лікваций.

Результати роботи можуть бути використані при вивченні впливу лікваций на напружено-деформований стан сляба при несталому процесі гарячої прокатки з метою розробки технологічних режимів, що дозволяють понизити вірогідність виникнення дефектів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Куберский С. В. Расчеты технологических и конструктивных параметров МНЛЗ : Учебн. пособ. / С. В. Куберский, С. В. Семирягин, О. В. Федотов. – Алчевск : ДонГТУ, 2006. – 148с. – ISBN 966-310-136-9.
2. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки.– К.:Техника, 1988.–253 с.
3. Атлас дефектов стали.: Пер. с нем.– М. : Металлургия, 1979.– 188 с.
4. Теория непрерывной разливки/В С. Рутес, В. И. Аскольдов, Д. П. Евтеев и др.– М. : Металлургия, 1971 – 296 с.
5. Новиков И. И., Золотаревский В. С. Дендритная ликвация в сплавах,– М. : Наука, 1966.– 158 с.
6. Ефимов В. А. Исследование процессов гидродинамики и массопереноса при формировании стальных слитков//Проблемы стального слитка.–М., 1974.– С. 17–33.
7. Манохин А. П. Получение однородной стали М. : Металлургия, 1978.– 224 с.
8. Голиков И. Н., Масленков С. В. Дендритная ликвация в сталях и сплавах.– М. : Металлургия, 1977.– 224 с.
9. Сладкоштеев В. Т. Некоторые проблемы дальнейшего развития непрерывного литья стали // Проблемы стального слитка.– М., 1976 – С. 347–352.
10. Мовчан Б.А. Границы кристаллов в литых металлах и сплавах.– К. : Техніка, 1970.– 212 с.
11. The redistribution of solute atoms during the solidification of Metals. Filler / W. A., Jackson K. A., Kuttler J. W., Chalmers B // Acta Met,– 1953.– July, L– P. 429.
12. Теория непрерывной разливки/В С. Рутес, В. И. Аскольдов, Д. П. Евтеев и др.– М. : Металлургия, 1971 – 296 с.
13. Сладкоштеев В. Т., Ахтырский В. И., Потанин Р. В. Качество стали при непрерывной разливке.– М. : Metallurgizdat, 1963.– 174 с.

14. Влияние основных видов зональной ликвации в широких слябах на качество литого и катаного металла, Ф. М. Мурасов, В. Е. Гирский, В. А. Есюнина и др. // Проблемы стального слитка. – М., 1974. – С. 669–677.
15. Влияние скорости разливки стали на качество, непрерывных слитков / Д. К. Бутаков, С. М. Олерская, С. В. Гальперина и др. // Проблемы стального слитка. – М., 1976. – С. 388–390.
16. Влияние технологии непрерывной разливки на развитие осевой ликвации в широких слябах / Ф. М. Мурасов, В. Е. Гирский, В. А. Есюнина и др. // Проблемы стального слитка. – М., 1974. – С. 673–677.
17. Явойский В. И., Деринг К., Вишкарев А. Ф. Влияние условий охлаждения на химическую и кристаллическую неоднородность непрерывного слитка и его модели // Проблемы стального слитка. – М., 1969. – С. 332–337.
18. Ефимов П. Е., Хорев В. Н. Кристаллизация кипящей стали при непрерывной разливке // Чер. металлургия, Бюл. НТИ. – 1966. – №17(541). – С. 47–48.
19. Дюдкин Д. А., Хохлов С. В., Кондратюк А. М. Анализ причин образования угловых трещин в непрерывно-литых плоских заготовках // Сталь. – 1986. – № 2. – С. 36–39.
20. Chashi T. Study on Solidification, Segregation and Fluid Flow of Molten Steel in Continuously Cast Slabs. I. N. E. // Trails. Iron and Steel Insf. Japaa. – 1975. – NO. 1, 15, No. 11. – P. 571, 579.
21. Kumai K. .Study on Solidification Behaviour, Solute Segregation and Fluid Flow in Continuously Cast Slab // Tetsu to Hagane. – 1974. – 60. – P. 895–914.
22. Proceedings of the Electric Furnace Conference AIME, V 27, Detoit Melting. December 10–12.
23. Alberny R. Presentation de la coulee continue // Revue de Metallurgie – CIT. – 1980. – No. 7. – S. 581–597.
24. Куберский С.В. Влияние содержания основных примесей и параметров непрерывной разливки на развитие ликвационных процессов и качество металла / С.В. Куберский, В.А. Луценко, П.В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2010. – Вып. 31. – С. 105-114

25. Математическое моделирование прокатки непрерывно-литого слитка из стали ШХ15 на стадии неполной кристаллизации его сердцевины/ А.А. Миленин, Х. Дыя, А.Б. Стеблов и др.//Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: С. Науч. Тр...:- ДГМА. Краматорск.- 2000.- с. 178-183.

26. Смирнов Е.Н., Григорьев, Передереев В.В., Скляр В.А. Теоретический CAD/CAE анализ теплового состояния непрерывнолитого бляма в зоне мягкого обжатия// Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр. – ДДМА, Краматорськ, -2004.- с. 656-661.

27. Смирнов Е.Н., Скляр В.А. Моделирование и исследование особенностей процесса деформирования непрерывнолитой заготовки с дефектом формы «ромбичность»//Наукові праці ДонНТУ.- випуск 10 (141).- Донецьк.-2008.-с. 149-157.

28. Паршин В.А. Деформируемость и качество / В.А. Паршин, Е.Г. Зудов, В.Л. Колмогоров – М.: Металлургия, 1979. – 192 с.

29. Колмогоров В. Л. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров, А. А. Богатов, Б. А. Мигачев и др. – М. : Металлургия, 1977. – 336 с.

30. Кузьменко В. И. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования / В. И. Кузьменко, В. Ф. Балакин. – Киев : Техніка, 1990. – 136 с.

31. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. посіб. – Алчевськ. ДонДТУ, 2012 – 170 с.

32. ABAQUS, Version 7.6 Documentation. TESIS Ltd. 2007

33. А.И. Целиков. Теория прокатки/ Целиков А.И., Гришков О.В. – М.: Металлургия, 1970.– 358 с.