

РЕОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛІ ПІД ЧАС ЇЇ ОБРОБЛЕННЯ РІЗАННЯМ

© Ступницький В.В. 2015

В статті наведені результати аналізу реологічної моделі, що формалізує вплив основних технологічних чинників на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталі лезовим інструментом. Результати такого проблемно-орієнтованого імітаційного моделювання силових, температурних та деформаційних параметрів є основою для побудови прогнозуючих моделей впливу структури та параметрів технологічного процесу на формування комплексу експлуатаційних властивостей виробу.

An analysis of rheological model that formalizes the main technological factors influence the formation of residual stresses and deformations during machining parts by cutting tool are presents in the article. The results of such problem- oriented simulation modeling power, temperature and deformation parameters is the basis for forecasting models influence the structure and process parameters on the formation of the product's complex operational properties.

Постанова проблеми. Для аналізу впливу дії силових чинників формоутворення, інтенсивності вібраційних процесів інструменту та деталі, що формують показники точності та якості різання, спричиняють пластичні та пружно-пластичні деформації оброблюваного шару заготовки необхідно знати величину та динамічний розподіл цих сил. Дослідження, що проводяться в області динаміки різання, можна здійснювати 2-ма методами: 1) аналітичний розв'язок системи рівнянь для розрахунку сил різання на основі аналізу процесу руйнування як часткового випадку процесу пластичної деформації (зсуву) [1]; 2) визначення сил різання на основі імітаційного реологічного моделювання в системі, що реалізує метод скінчених елементів [3,4,5]. Причому остатній вид дослідження здійснюється не тільки з метою встановлення адекватності теоретичних основ формоутворення оброблюваних поверхонь, але, в основному, для ефективного аналізу динамічного напружено-деформованого стану заготовки та інструменту в різних областях зони стружкоутворення, при різних крайових умовах моделювання (геометрія інструменту, матеріали, режими різання тощо) для подальшого використання в оптимізаційних моделях, що використовуватимуться для реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема та напрямок дослідження розглядаються у багатьох літературних джерелах [1,2,3,4,5]. Для аналізу впливу різних чинників на реологічну картину різання проведені імітаційні дослідження з різними матеріалами, режимами оброблення та геометричними параметрами різального інструменту. Хімічний склад, механічні властивості, мікроструктура в першу чергу впливають на оброблюваність сталей та температуру в зоні різання [1,6]. Крім того, на початку процесу різання в зоні формоутворення відбуваються інтенсивні перехідні процеси, що супроводжуються різкими перепадами силового та напружено-

деформованого стану виробу і є джерелом автоколивань інструменту [7], втратою стійкості заготовки, термодформаційними явищами [8], які матимуть вплив на формування точнісних та інших експлуатаційних властивостей виробу в цілому.

Відомо [8], що температура в зоні різання в межах $(0,25...0,3) T_{пл}$ викликає відпуск деформованого металу поверхневого шару, а температура вище $0,4 T_{пл}$ — його рекристалізацію, супроводжуючись частковим або повним зняттям деформаційного зміцнення ($T_{пл}$ — температура плавлення металу). Тобто, в процесі оброблення різанням в поверхневому шарі оброблюваної заготовки одночасно протікають два протилежні процеси: деформаційне зміцнення і термодинамічне розм'якшення. Фізичний стан поверхневого шару заготовки визначається співвідношенням інтенсивності і швидкості цих процесів. І аналітично описати цей динамічний процес вкрай складно [9,10]. Зменшення дійсного значення межі текучості σ_t в порівнянні з σ_{t0} початкового матеріалу можна пояснити переважним впливом теплового чинника, що призводить до розм'якшення матеріалу. Збільшення напруження зсуву τ_{xy} матеріалу зрізуваного шару в порівнянні з τ_{xy0} початкового матеріалу можна пояснити тим, що наявність випереджаючої зони деформації призводить до інтенсивного зростання густини дислокацій поблизу зони зсуву, а отже, і до зміцнення матеріалу. Це відбувається внаслідок того, що шари матеріалу від головного різального леза, вершинної частини радіусу леза і допоміжного різального леза нашаровуються один на одного при їх русі по відповідних площинах зсуву, тобто відбувається «самозаклинювання» шарів матеріалу кореневої зони стружки [11]. Очевидно, що інтерферентні залишкові напруження від всіх цих чинників є різноплановими і протилежними за знаками. Встановити домінуючий чинник і не враховувати інші — є складною задачею, що вимагає додаткових експериментальних досліджень. Крім того, в багатьох випадках дії всіх трьох чинників є приблизно рівнозначними і взаємопов'язаними. Тому можливості імітаційного реологічного моделювання — це єдиний шлях оперативного та адекватного аналізу впливу технологічних параметрів різання (структури технологічного переходу, режимів оброблення, вибору зовнішнього технологічного середовища тощо) на формування залишкових деформацій.

Мета та постановка задачі досліджень.

Основною метою проведення досліджень є оцінка взаємного впливу основних технологічних параметрів (режимів різання) на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталі лезовим інструментом. Вплив режимів різання на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталі представляють, як правило, у вигляді статичних залежностей [9], заснованих на проведенні експериментів по методиці одно- або багатофакторного експерименту. Тому основною задачею, вирішення якої пропонується в даній статті є узагальнення та системний аналіз методологічних досліджень впливу силових, температурних чинників та параметрів геометрії різального інструменту на формування напружено-деформованого та термодинамічного стану поверхонь деталей з різномірних машинобудівних матеріалів в процесі різання. Аналіз такого проблемно-орієнтованого імітаційного моделювання силових, температурних та деформаційних параметрів є основою для побудови прогнозуючих моделей впливу структури та параметрів технологічного процесу на формування комплексу експлуатаційних властивостей виробу

Основний зміст статті

Фізико-механічний та структурно-хімічний стан поверхневого шару деталі (залишкові напруження та деформації, структурно-фазовий, механічний стан і хімічний склад тощо) в основному визначається післядією пружно-пластичної деформації, що відбувається в зоні стружкоутворення, температурним впливом та хімічною взаємодією оброблюваного матеріалу в зоні різання з матеріалом різального інструменту і зовнішнім технологічним середовищем (в т.ч. мастильно-охолоджувальною рідиною). При врізанні різального інструменту в оброблюваний метал хвиля пластичної деформації, поширюючись попереду різального клину інструменту, охоплює не лише стружку, але і метал, розташований за лінією зрізу. Тому матеріал обробленої поверхні біля самої різальної кромки підлягає дії нормальної сили і сили тертя, що діє у напрямі лінії зрізу. Нормальна сила викликати напруження стиску, а сила тертя — напруження розтягу поверхневого шару, прилеглого до задньої грані інструмента (рис.1). Тобто, поверхневий шар деталі підлягає неоднорідній пластичній деформації, монотонно затухаючій по глибині різання [12].

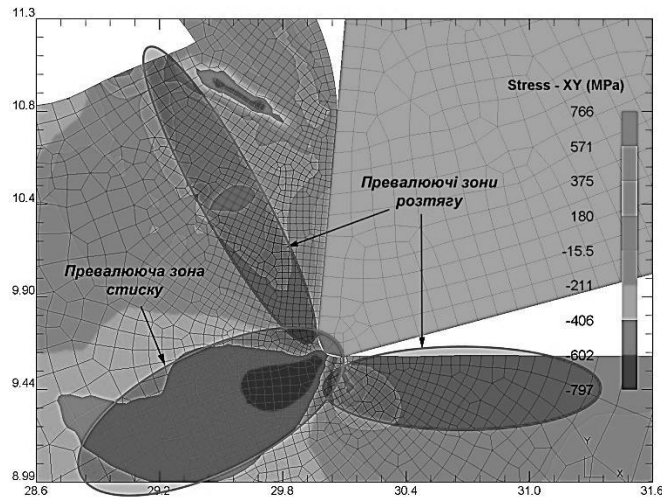


Рис.1. Імітаційна інтерпретація причинно-наслідкових чинників виникнення залишкових напружень I роду як інтерференції деформаційних явищ стиску та розтягу в зоні різання

Ще одна причина виникнення залишкових напружень полягає у аналізі термодинамічних та деформаційних глибинних процесів [9]. Зовнішній шар металу обробленої частини заготовки, нагріваючись в процесі різання, прагне лінійного розширення, проте цьому перешкоджає холодніший внутрішній шар, отже, перший піддається стиску, а другий — розтягу. При інтенсивному нагріві поточні напруження $\bar{\sigma}$ на поверхні переважають межу текучості σ_T , що спричинює пластичну деформацію стиску зовнішнього шару металу. Під час подальшого охолодження, зовнішній шар прагне стиснутися до розмірів, менших первинних на величину додаткової пластичної деформації стиску. Цьому перешкоджатиме напружений внутрішній шар заготовки. В результаті в зовнішньому шарі виникнуть напруження розтягу, а у внутрішніх — напруження стиску (рис.1). Таким чином, залежно від умов та режимів оброблення різанням, домінуючим може бути або механічний чинник, і тоді на обробленій поверхні превалюватимуть макронапруження стиску; або тепловий чинник, і тоді на поверхні переважаючими стануть макронапруження розтягу. Проте, цей алгоритм буде порушений, якщо процес різання супроводжуватиметься значними за інтенсивністю та глибиною фазовими перетвореннями, що є іноді сильнішим джерелом утворення макронапружень в поверхневих шарах, ніж механічний і тепловий чинники [13].

Недоліком адитивного аналітичного моделювання процесу утворення макронапружень є умовність в відокремленому розгляді впливу механічного або теплового чинників, залежність від експериментально визначених поправочних коефіцієнтів, а також те, що вона не враховує градієнт силового навантаження, що діє на поверхневий шар при обробленні деталі. Ця умовність не відповідає реальній картині виникнення макронапружень [9]. Єдиним шляхом аналізу досі вважалися методи експериментальних досліджень: рентгенографічний, експериментально-механічний (метод Н.Н. Давиденкова) та метод вимірювання мікротвердості (по М.М. Хрущову) [14]. Проблемно-орієнтований аналіз результатів відповідного імітаційного реологічного моделювання дозволить комплексно та адекватно оцінити картину взаємного впливу силового, механічного та металографічного чинника. Це сприятиме реалізації оптимальної, з точки зору мінімізації впливу залишкового напруження та деформації, структури та параметрів технологічної операції оброблення деталей.

Наявність залишкових напружень та пластичних деформацій, генерованих внаслідок процесу різання, підтверджується результатами вимірювання мікротвердості [9]. Тонкий поверхневий шар деталей машин має інші механічні, фізичні, хімічні властивості і напружений стан, ніж в глибинній частині металу. Хоча глибина деформованого поверхневого шару, залежно від виду оброблення, знаходиться в межах від декількох десятитисячних до сотих і десятих долей міліметра, проте ця величина має визначальний вплив на триботехнічні властивості, а відтак і

працездатність деталей машин. Як зазначалось вище, відмінність властивостей тонких поверхневих шарів від властивостей серцевини заготовки обумовлена сумою механічних, теплових і фізико-хімічних дій на поверхню металу і формується як результат силового та термодинамічного процесу, що супроводжує виконання технологічного переходу. Це призводить до зростання вільної енергії поверхні, збільшення її адсорбційної активності і інших змін, що мають істотний вплив на експлуатаційні характеристики деталі [6].

Особливо важливим є те, що пластична деформація супроводжується структурними змінами в матеріалі поверхневого шару. У кристалічній ґратці різко зростає кількість дислокацій, вакансій і інших дефектів. При різанні відбувається пластична деформація, що супроводжується подрібненням і витягуванням кристалічних зерен у напрямі деформації (утворення текстури), викривленням площин ковзання і появою на них уламків кристалічних зерен, виникненням міжкристалічних напружень [9]. Крім того, при обробці пластичних металів підповерхневий шар деформується не лише під впливом силового поля передньої поверхні різця, але одночасно деформується під впливом стікаючої стружки. У зв'язку з тим, що інтенсивність пластичної деформації металу стружки значно вище за інтенсивність деформації металу під поверхнею зсуву, деформовані частки під впливом верхнього шару металу, що йде в стружку, додатково витягуються у напрямі стружки, і у момент відділення орієнтуються по відношенню до напрямку вектору швидкості під кутом більше 45° . При цьому збільшується питомий об'єм металу і знижується його густина, підвищуються межа міцності, твердість і крихкість, зменшуються пластичність і в'язкість, змінюються магнітні і деякі інші властивості металу [9].

В процесі оброблення деформація шарів оброблюваного матеріалу виникає не лише в області кута зсуву β , але і попереду різця і під площиною зсуву. Пластичній деформації передуює пружна. Тому пружнодеформовані шари матеріалу відновлюються так, що оброблена поверхня після проходження різця піднімається відносно площини різання на якусь величину h_z (рис.2) На відміну від пружних, пластичні деформації призводять до того, що в поверхневому шарі деталі метал отримує наклеп або оброблювальну твердість, яка характеризується: 1) спотворенням кристалічної ґратки і виникненням внутрішнього залишкового напруження; 2) сильним подрібненням зерен металу [15]; 3) появою текстури, тобто переважного орієнтування зерен в певному напрямі.

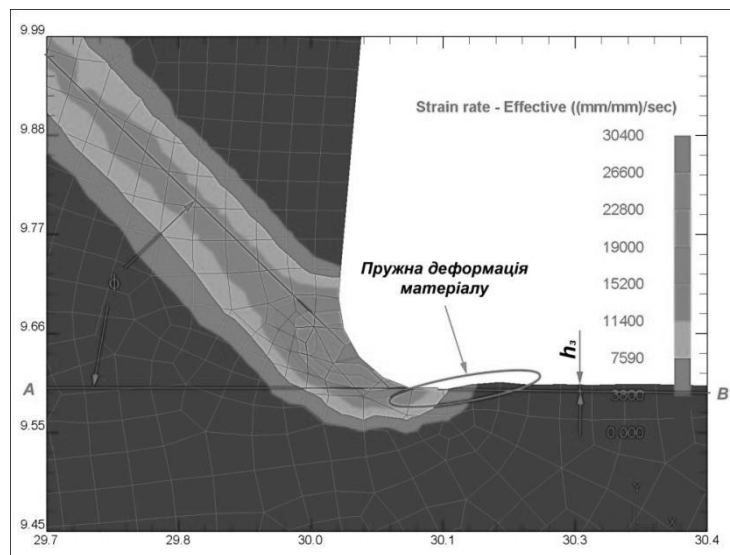


Рис.2. Реологічна картина пружної деформації металу в зоні задньої поверхні різального клина.

На рис.3 (а) наведений приклад реологічного 3D моделювання токарного оброблення деталі зі сталі 45 (аналог AISI 10451) в системі Deform3D. Загальний шлях інструменту ($L=11,6$ мм)

¹ Стандарт США : ASTM A29, стандарт Японії JIS S 45C, Швеції: SS 1672

розділений на 24 діапазони вимірювань (рис.3.(б)) з метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ деформаційної складової післядії процесу оброблення.

В результаті реологічного моделювання можна встановити величини залишкових напружень ($\pm\sigma_r$), глибину їх залягання і закон розподілу. Очевидно, що в межах вирішення даної задачі моделюватись будуть тільки термдеформаційні залишкові напруження I роду (за класифікацією Н.І.Давиденкова), що виникають в процесі виготовлення деталі, які врівноважуються в об'ємі всієї заготовки або в об'ємі її макрочастин. Структурно-фазові залишкові напруження II роду формуються внаслідок фазової деформації окремих кристалітів, зерен і урівноважуються в об'ємі останніх. Реологічне моделювання таких процесів вимагає якісно іншої постановки задачі і розглянуто в роботі [16]. Напруження III роду врівноважуються в субмікрооб'ємах, співмірних з міжатомарними віддальми і не є домінуючими при формуванні поверхневого шару, як наслідок параметричного впливу технологічних чинників, а тому в даній роботі проводитись не будуть.

На рис.3-6 наведені картини реологічного моделювання залишкових напружень I роду в результаті токарного оброблення деталі зі сталі 45 (аналог AISI 10452) в системі Deform3D. Ці напруження, що виникають внаслідок утворення в поверхневому шарі дислокацій та дислокаційних стінок, експоненційно зменшуються в результаті термодинамічної релаксації із зростанням віддалі l від вершини різального клину вздовж обробленої поверхні повільніше, ніж $l^{2.5}$ (рис.6). Глибина залягання пластичних деформацій визначається на основі вирішення задачі Прандтля [10] про те, що довжина пластично деформованої ділянки l при втискуванні площинного індентора еквівалентна розміру Δ цього індентора:

$$l = \frac{\Delta}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

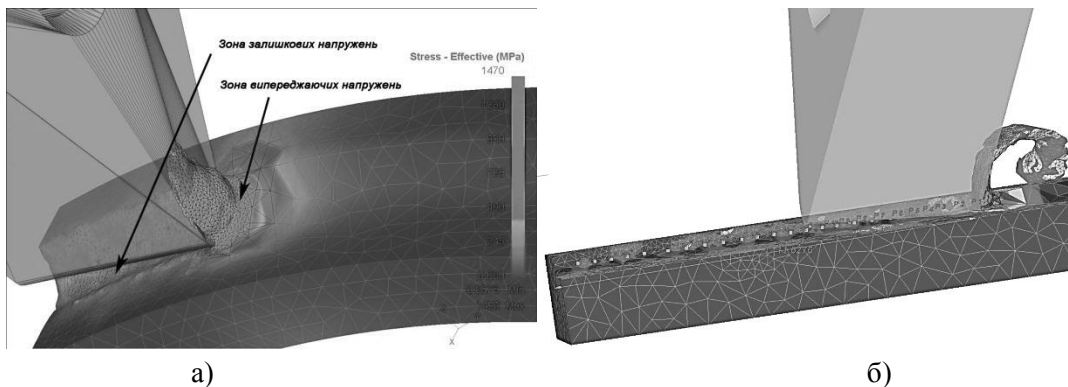


Рис.3. Приклад реологічного 3D моделювання токарного оброблення деталі зі сталі 45 в системі Deform3D

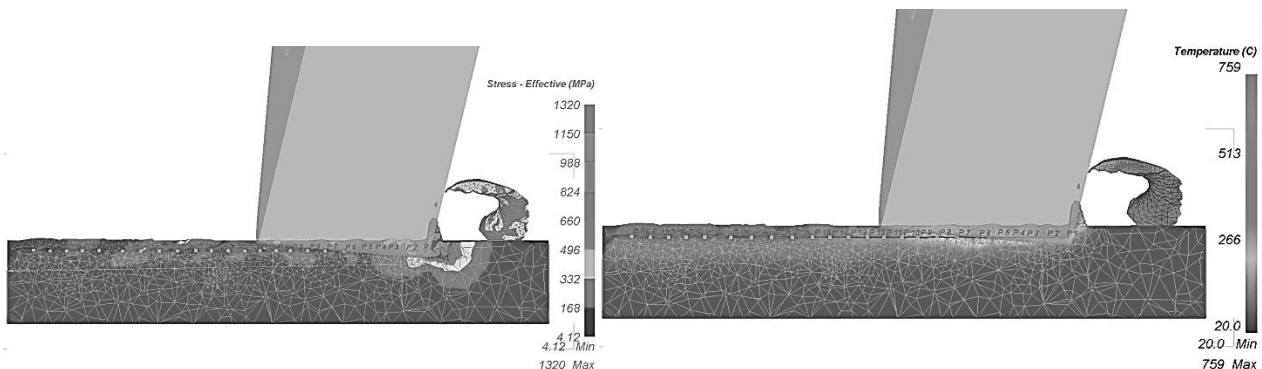


Рис.4. Приклад реологічного 3D моделювання термодинамічного стану заготовки в результаті оброблення

² Стандарт США : ASTM A29, стандарт Японії JIS S 45C, Швеції: SS 1672

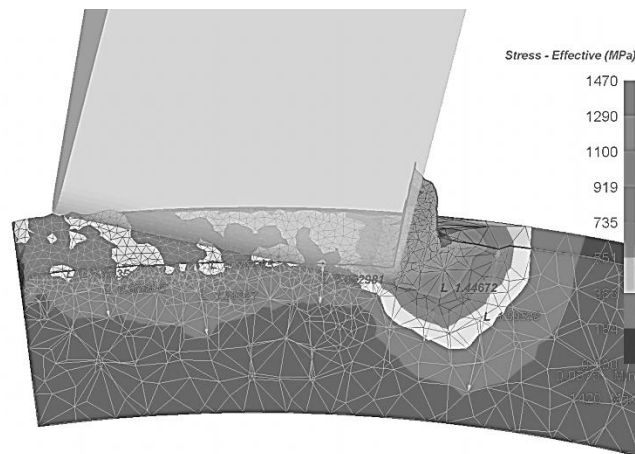


Рис.5. Глибина залягання залишкових напружень, що виникли в результаті виконання технологічного переходу токарного оброблення деталі зі сталі 45 в системі Deform3D

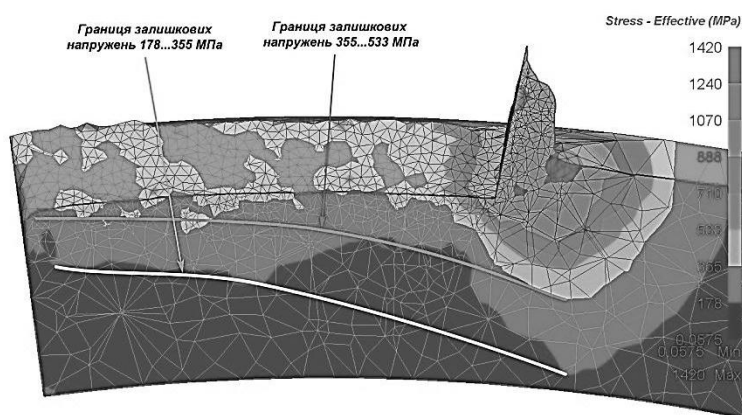


Рис.6. Ізостресовий аналіз залишкових напружень, що виникли в результаті виконання технологічного переходу токарного оброблення деталі зі сталі 45 в системі Deform3D

Графічний аналіз результатів реологічного моделювання (рис.7 (а)) дозволяють зробити висновки про те, що температурний режим оброблення носить експотенційний характер, що з високою мірою достовірності аналітично описується рівнянням:

$$T(l) = -0,045l^3 + 2,613l^2 - 54,251l + 514,34 \quad (2)$$

Причому стабілізація температури в межах 100°C наступає на віддалі 10-13 мм від вершини різального леза. Загальне охолодження до температури навколишнього середовища наступає протягом неспівмірно тривалішого часу (охолодження з 500°C до 100°C – час 0,003 с, а час охолодження з 100°C до 20°C приблизно 1700 с) і суттєвого впливу на формування залишкових напружень не має.

Крива термодеоформаційних напружень I роду є більш складною, оскільки відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (фрикційних) та стискаючих (силових) навантажень та змінну картину глибинних термічних впливів. У зв'язку з цим при навантаженні деталі по знакосталому циклу стиску, що характерне для поступальної подачі різального інструменту, у вершині концентратора реально здійснюється знакозмінний цикл напружень, стискаюча частина якого визначається зовнішнім навантаженням, а розтягувальна - залишковими напруженнями. Як показав Л. Хаббард [6], пластична зона біля вершини концентратора не змінюється, а залишкові напруження розтягу від вершини різального клина зменшуються хвилюподібно по мірі її зростання. Цю картину наочно можна спостерігати на рис.7 (б). Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно 160 МПа при обробленні заготовки зі сталі 45.

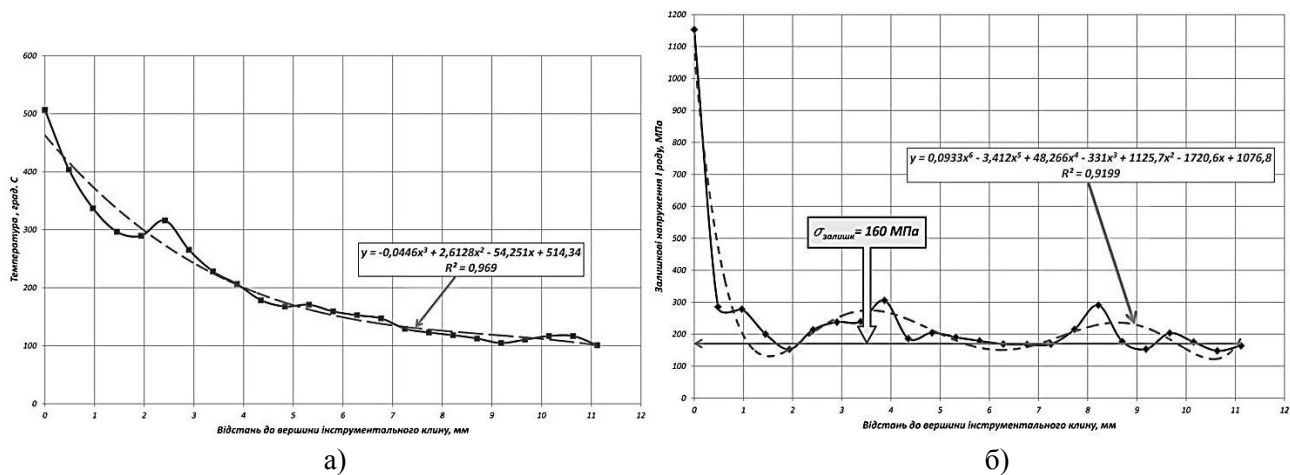


Рис.7. Графічні залежності температури та залишкових напружень I роду, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу токарного оброблення заготовки зі сталі 45

Висновки. Аналіз впливу параметрів технологічних переходів – режимів різання, інструментальних матеріалів тощо на формування залишкових напружень I роду, проведений на основі реологічного моделювання в системі Deform 3D, дозволив зробити деякі висновки.

1. Вплив швидкості різання проявляється, перш за все, в зміні теплової дії і в зміні тривалості теплової і силової дії на інструмент. Тому підвищення швидкості різання сприяє появі додаткового розтягуючого напруження, яке збільшує загальну величину залишкових напружень розтягу. При обробленні низьковуглецевих сталей (наприклад – сталь 20), збільшення кількості теплоти в зоні різання, пов'язане з підвищенням швидкості різання, може призвести до загартування поверхневого шару. Збільшення питомого об'єму металу поверхневого шару при його загартуванні призводить до зниження залишкових напружень розтягу, що формуються при малих швидкостях ($V=40\dots80$ м/хв), і перетворення їх в напруження стиску при обробленні на великих швидкостях різання ($V>100$ м/хв).

2. При обробленні середньовуглецевих (наприклад, сталь 45) та легованих сталей (34Х2Н2М) збільшення нагрівання поверхневого шару при збільшенні швидкості різання понад 120 м/хв може сприяти відпуску матеріалу. Внаслідок цього відбуваються структурні зміни, пов'язані зі зменшенням питомого об'єму металу, що призводить до зниження залишкових напружень стиску. Збільшення подачі при обробленні пластичних сталей, наприклад, жароміцних (ХН60Ю (аналог ІН718)), у яких формується залишкове розтягувальне напруження, призводить до зростання пластичної деформації поверхневого шару і відповідного зростання залишкових напружень розтягу.

1. Интегрированные генеративные технологии / А.И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А. И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с. 3. Ступницький В.В. Дослідження напружено-деформованого стану деталей машин під час їх механічного оброблення у зоні стружкоутворення / В.В.Ступницький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів».- Львів.- 2012.- №730.- С. 125-129. 4. Ступницький В.В. Моделювання напружено-деформованого стану матеріалу в зоні різання для структурно-параметричної оптимізації технологічної операції токарного оброблення / В.В.Ступницький // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні».- 2011.- №713.-с. 45-49. 5. Ступницький В.В. Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу / В.В.Ступницький// Вісник Донецького національного технічного університету «Прогресивні технології і системи машинобудування». - 2013.- Вип.1 (45). – 2 (46).- с. 249-256. 6 Яцерицын П.И. Теория резания /П.И.Яцерицын, Е.Э.Фельдштейн, М.А.Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006.- 512 с. 6. Технологические остаточные напряжения /[А.В. Подзей, А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев и др.].- М.: Машиностроение, 1973.- 216 с. 7. Ступницький В.В. Математичне моделювання автоколивань різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні / В.В.Ступницький, Я.М.Новіцький //

Машинознавство. - 2013. — №1-2 (187-188).- С.19-22. 8. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников.— М.: Машиностроение, 1990. -288 с.

9. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин /А.М.Сулима, В.А.Шулов, Ю.Д. Ягодкин. — М.: Машиностроение, 1988. —240 с. 10. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г.Суслов.- М.: Машиностроение, 2000. — 320 с.

11. Бишутин С.Г. Инженерия поверхностей деталей машин, подвергаемых механической обработке / С.Г.Бишутин, О.Н.Федонин // Вестник Брянского государственного технического университета.- 2007.- № 1(13).- С.7-13 12. Технологические остаточные напряжения / [А.В. Подзей, А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев и др].- М.: Машиностроение, 1973.- 216 с.

13. Ступницький В.В. Визначення деформаційної складової параметру шорсткості із застосування методів реологічного імітаційного моделювання процесу різання / В.В.Ступницький // Машинознавство. — 2013. — №7-8 (193-194).- С.45-48. 14. Хрущев М.М. Склерометрия: теория, методика, применение испытаний на твердость царапанием / М. М. Хрущев.- М., 1968.- 219 с.

15. Klocke F. Development of a Material Damage Model for the Prediction of Chip Breakage / F.Klocke, D.Lung, C.Essig, M.Abouridouane// Proceedings of The 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2011).- Aachen.- 2011.- P.612-617. 16. Dolyniak Yaroslav, Stypnysky Vadym. Rheological modeling and analysis of the influence of technological factors on the 2nd kind's residual stresses formation/ Austrian Journal of Technical and Natural Sciences.- «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH.- №9-10.- 2015.