

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

© Ступницький В. В., 2016

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

Ключові слова: технологічний процес, різання, реологічна модель, напружено-деформований стан, залишкове напруження, залишкова деформація, функціональне орієнтоване проектування.

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.

Key words: technological process, cutting, rheological model, mode of deformation, residual stress, residual deformity, functional-oriented planning production.

Постановка проблеми. Для аналізу впливу дії силових чинників формоутворення, інтенсивності вібраційних процесів інструмента та деталі, що формують показники точності та якості різання, спричинюють пластичні та пружно-пластичні деформації оброблюваного шару заготовки, необхідно знати величину та динамічний розподіл цих сил. Дослідження в області динаміки різання можна здійснювати двома методами: 1) аналітичне розв'язання 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 скінченних елементів [3–5]. Причому останній вид дослідження здійснюється не тільки з метою встановлення адекватності теоретичних основ формоутворення оброблених поверхонь, але переважно для ефективного аналізу динамічного напружено-деформованого стану заготовки та інструмента в різних областях зони стружкоутворення, за різних крайових умов моделювання (геометрія інструмента, матеріали, режими різання тощо) для подальшого застосування в оптимізаційних моделях, що використовуватимуться для реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема та напрям дослідження розглядаються у багатьох літературних джерелах [1–5]. Для аналізу впливу різних чинників на реологічну картину різання проведено імітаційні дослідження з різними матеріалами, режимами оброблення та геометричними параметрами різальних інструментів. Хімічний склад, механічні властивості, мікроструктура впливають передусім 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 інструментів [7], втрати стійкості заготовки, термодформаційних явищ [8], які впливають на формування точнісних та інших експлуатаційних властивостей усього виробу.

Відомо [8], що температура в зоні різання в межах $(0,25...0,3) T_{пл}$ спричиняє відпуск деформованого металу поверхневого шару, а температура вище за $0,4 T_{пл}$ – його рекристалізацію, супроводжуючись частковим або повним зняттям деформаційного зміцнення ($T_{пл}$ – температура плавлення металу). Тобто в процесі оброблення різанням у поверхневому шарі оброблюваної заготовки одночасно відбуваються два протилежні процеси: деформаційне зміцнення і термодинамічне розм'якшення. Фізичний стан поверхневого шару заготовки визначається співвідношенням інтенсивності та швидкості цих процесів. І аналітично описати цей динамічний процес вкрай складно [9,10]. Зменшення дійсного значення межі текучості σ_T порівняно з σ_{T0} початкового матеріалу можна пояснити переважним впливом теплового чинника, що призводить до розм'якшення матеріалу. Збільшення напруження зсуву τ_{xy} матеріалу зрізаного шару порівняно з τ_{xy0} початкового матеріалу можна пояснити тим, що наявність випереджувальної 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 радіуса леза і допоміжного різального леза нашаровуються один на одного під час їх руху 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 складним завданням, 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 завдання досліджень. Основною метою досліджень є оцінювання 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 у процесі механічного оброблення деталі представляють, як правило, у вигляді статичних залежностей [9], оснований на результатах експериментів за методикою одно- або багатофакторного експерименту. Тому основним завданням, вирішення якого пропонується в цій 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 різнорідних машинобудівних матеріалів у процесі різання. Аналіз такого проблемно-орієнтованого імітаційного моделювання силових, температурних та деформаційних параметрів є основою для побудови прогнозувальних 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 (зокрема мастильно-охолоджувальною рідиною). Коли різальний інструмент врізається в оброблюваний метал, хвиля пластичної деформації, поширюючись попереду різального клину інструмента, 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 зазнає неоднорідної пластичної деформації, що монотонно загасає по глибині різання [12].

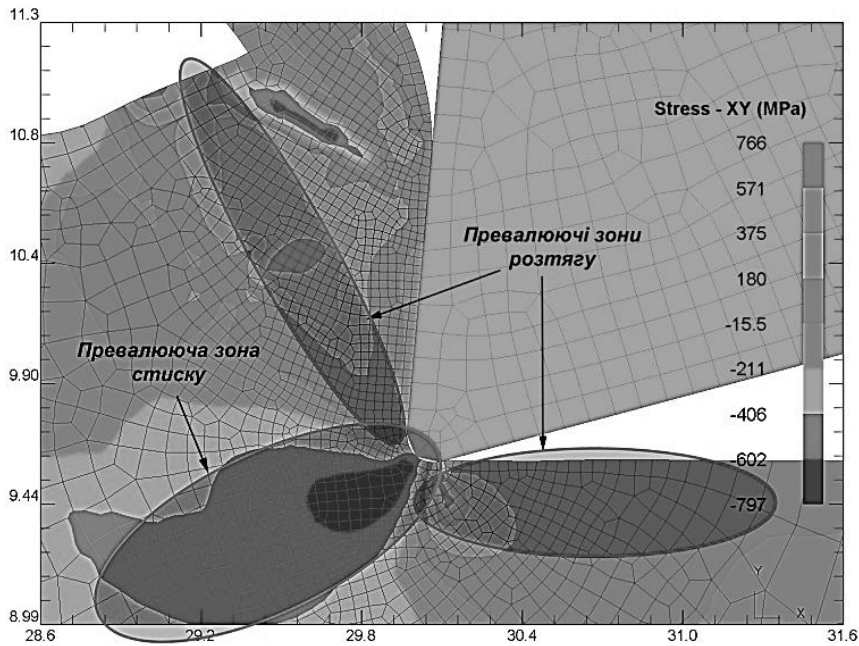


Рис. 1. Імітаційна інтерпретація причинно-наслідкових чинників виникнення залишкових напружень першого роду як інтерференції деформаційних явищ стиску та розтягу в зоні різання

Ще одна причина виникнення залишкових напружень полягає в 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 зазнає стиску, а другий – розтягу. Під час інтенсивного нагрівання 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 від 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). Отже, залежно від умов та режимів оброблення різанням, домінувати може або механічний чинник, і тоді на обробленій поверхні превалюватимуть макронапруження стиску; або тепловий чинник, і тоді на поверхні переважатимуть 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 у поверхневих шарах, ніж механічний і тепловий чинники [13].

Недоліком адитивного аналітичного моделювання процесу утворення макронапружень є умовність у відокремленому розгляді впливу механічного або теплового чинників, залежність від експериментально визначених поправкових коефіцієнтів, а також те, що вона не враховує градієнт силового навантаження, що діє на поверхневий шар під час оброблення деталі. Ця умовність не відповідає реальній картині виникнення макронапружень [9]. Єдиним шляхом аналізу досі вважали методи експериментальних досліджень: рентгенографічний, експериментально-механічний (метод Н. Н. Давиденкова) та метод вимірювання мікротвердості (за М. М. Хрущовим) [14]. Проблемно-орієнтований аналіз результатів відповідного імітаційного реологічного моделювання дає змогу комплексно та адекватно оцінити картину взаємного впливу силового, механічного та металографічного чинника. Це сприятиме реалізації оптимальних, з погляду 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 та напружений стан, ніж у глибинній частині металу. Хоча глибина деформованого поверхневого шару, залежно від виду оброблення, у

межах від декількох десятитисячних до сотих і десятих часток міліметра, проте ця величина визначально впливає на триботехнічні властивості, а відтак і на працездатність деталей машин. Як зазначено вище, відмінність властивостей тонких поверхневих шарів від властивостей серцевини заготовки зумовлена 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 та інших змін, що істотно впливають на експлуатаційні характеристики деталі [6].

Особливо важливо, що пластична деформація супроводжується структурними змінами в матеріалі поверхневого шару. У кристалічній ґратці різко зростає кількість дислокацій, вакансій і інших дефектів. Під час різання 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, під час оброблення пластичних металів підповерхневий шар деформується не лише під впливом силового поля передньої поверхні різця, але й одночасно під впливом стружки, що стікає. Оскільки інтенсивність пластичної деформації металу стружки значно вища 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 стосовно напрямку вектора швидкості під кутом понад 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 та 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 передують пружна. Тому пружнодеформовані шари матеріалу відновлюються так, що оброблена поверхня після проходження різця піднімається відносно площини різання на якусь величину h_s (рис. 2) На відміну від пружних, пластичні деформації призводять до того, що в поверхневому шарі деталі метал матиме 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 у певному напрямі.

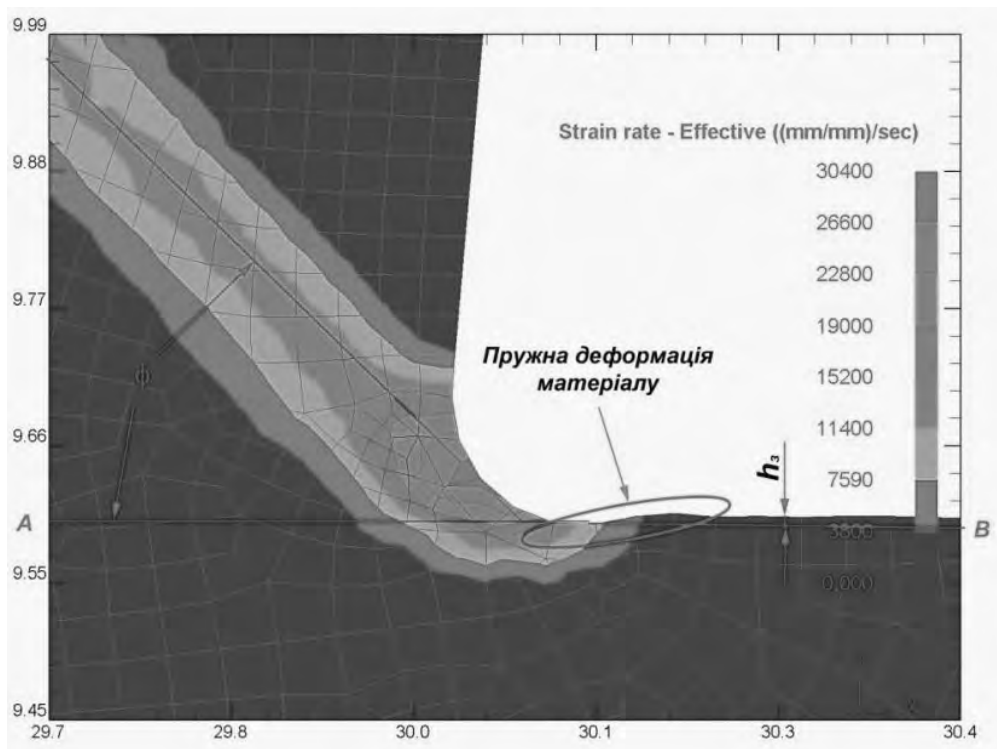


Рис. 2. Реологічна картина пружної деформації металу в зоні задньої поверхні різального клина

На рис. 3, а наведено приклад реологічного 3D-модельовання токарного оброблення деталі зі сталі 45 (аналог AISI 1045¹) в системі Deform3D. Загальний шлях інструмента (L = 11,6 мм) розділений на 24 діапазони вимірювань (рис. 3, б) з метою аналізу динаміки загасання та прояву незворотних залишкових явищ деформаційної складової післядії процесу оброблення.

У результаті реологічного моделювання можна встановити величини залишкових напружень ($\pm\sigma_r$), глибину їх залягання і закон розподілу. Очевидно, що в межах розв'язання цієї задачі моделюватимуться тільки термодформаційні 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 потребує якісно іншої постановки задачі й розглянуто в роботі [16]. Напруження III роду врівноважуються у субмікрооб'ємах, співмірних з міжатомарними віддалями, і не домінують під час формування поверхневого шару, як наслідок параметричного впливу технологічних чинників, тому в цій роботі їх не розглядаємо.

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

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

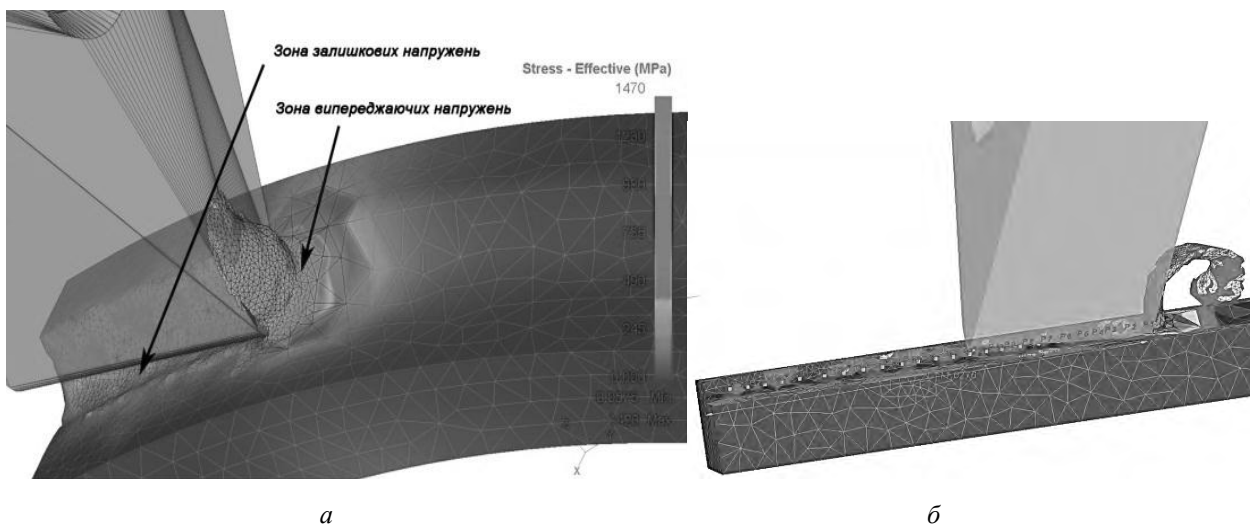


Рис. 3. Приклад реологічного 3D-модельовання токарного оброблення деталі зі сталі 45 у системі Deform3D

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

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

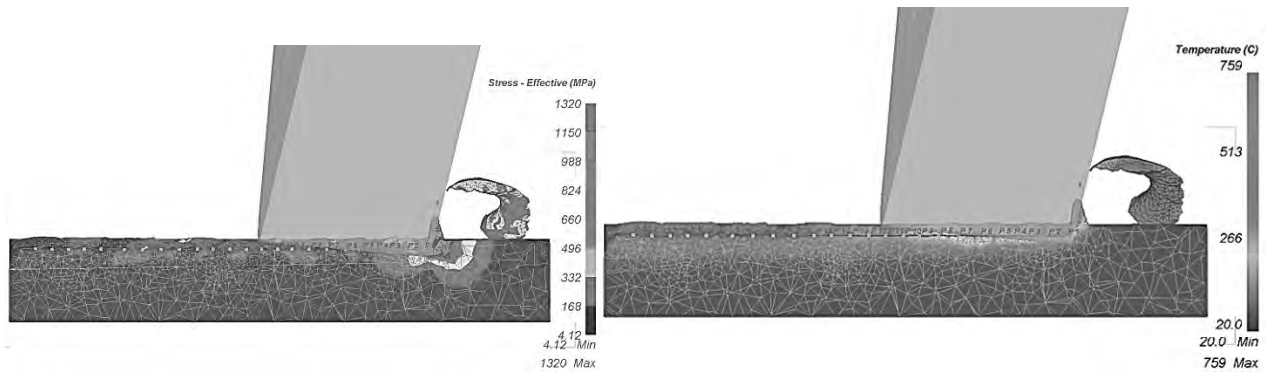


Рис. 4. Приклад реологічного 3D-моделювання термодинамічного стану заготовки в результаті оброблення

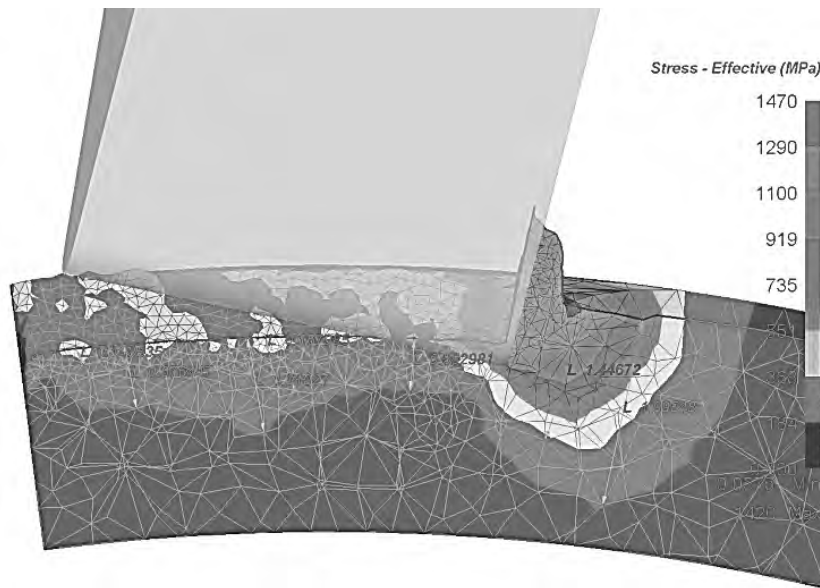


Рис. 5. Глибина залягання залишкових напружень, що виникли в результаті виконання технологічного переходу токарного оброблення деталі зі сталі 45 в системі Deform3D

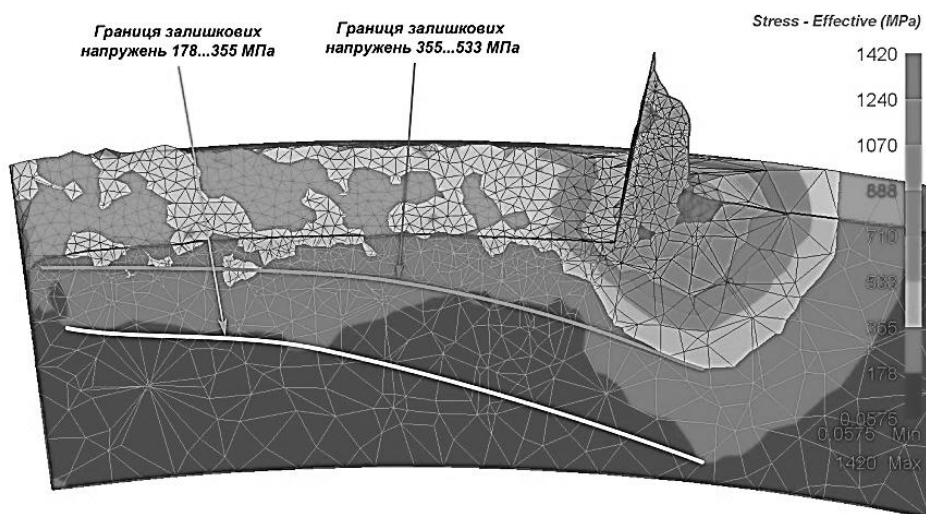


Рис. 6. Ізостресовий аналіз залишкових напружень, що виникли у результаті виконання технологічного переходу токарного оброблення деталі зі сталі 45 в системі Deform3D

Графічний аналіз результатів реологічного моделювання (рис. 7, а) дає підстави зробити висновки про те, що температурний режим оброблення є експоненційним, 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 °С настає на віддалі 10–13 мм від вершини різального леза. Загальне охолодження до температури навколишнього середовища відбувається протягом неспівмірно тривалішого часу (охолодження з 500 °С до 100 °С – час 0,003 с, а час охолодження з 100 °С до 20 °С приблизно 1700 с) й істотно на формування залишкових напружень не впливає.

Крива термодформацийних напружень I роду складніша, оскільки відображає інтерференційну картину прояву флуктуаційних розтягувальних (фрикційних) та стискувальних (силових) навантажень та змінну картину глибинних термічних впливів. У зв'язку з цим у разі навантаження деталі за знакосталим циклом стискання, що характерно для поступальної подачі різального інструмента, у вершині концентратора реально здійснюється знакозмінний цикл напружень, стискальна 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 хвилеподібно у міру її зростання. Цю картину наочно можна спостерігати на рис. 7, б. Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (за температури близько 100 °С) становитиме приблизно 160 МПа у разі оброблення заготовки зі сталі 45.

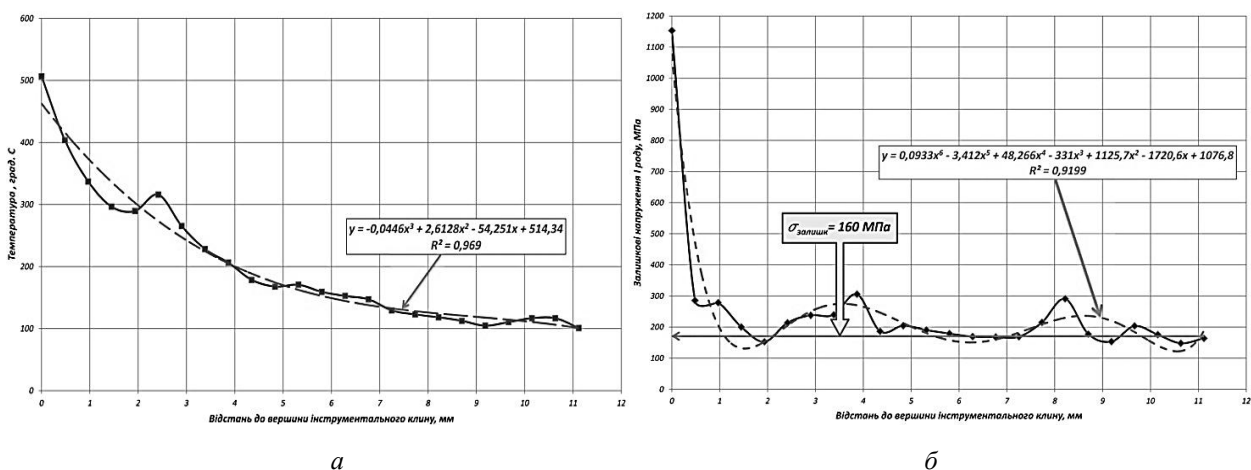


Рис. 7. Графічні залежності температури та залишкових напружень I роду, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу токарного оброблення заготовки зі сталі 45

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

1. Вплив швидкості різання проявляється, передусім, у зміні теплової дії та в зміні тривалості теплової та силової дії на інструмент. Тому підвищення швидкості різання сприяє появі додаткового розтягувального напруження, яке збільшує загальну величину залишкових напружень розтягу. Під час оброблення низьковуглецевих сталей (наприклад, сталь 20) збільшення кількості теплоти в зоні різання пов'язане з підвищенням швидкості різання, що може призвести до загартовування поверхневого шару. Збільшення питомого об'єму металу поверхневого шару в разі його загартовування призводить до зниження залишкових напружень розтягу, що формуються за малих швидкостей ($V=40 \dots 80$ м/хв), і перетворення їх на напруження стиску під час оброблення на великих швидкостях різання ($V>100$ м/хв).

2. Під час оброблення середньовуглецевих (наприклад, сталь 45) та легованих сталей (34X2H2M) збільшення нагрівання поверхневого шару за підвищення 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 під час оброблення пластичних сталей, наприклад, жароміцних (ХН60Ю (аналог IN718)), 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 Нац. ун-ту «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. 7. Технологические остаточные напряжения / [А. В. Подзей, А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с. 8. 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. 9. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с. 10. Сулима А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с. 11. Сулов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Сулов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. 12. 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. 13. Ступницький В. В. Визначення деформаційної складової параметра шорсткості із застосуванням методів реологічного імітаційного моделювання процесу різання / В. В. Ступницький // Машинознавство. – 2013. – № 7–8 (193–194). – С. 45–48. 14. Хруцев М. М. Склерометрия: теория, методика, применение испытаний на твердость царапанием / М. М. Хруцев. – 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, Stypnytskyi 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. – 2015. – № 9–10.*