

КОЛІСНИК К. Д.

АНАЛІЗ ПОЧАТКОВОГО ЕТАПУ ЗГИНАННЯ ОДНОРОГОГО КОВАНОГО ГАКА ВЕЛИКОЇ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ ПРИ РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМАХ

У роботі виконано чисельне моделювання початкового етапу згинання однорогого кованого гака великої вантажопідйомності в програмному середовищі QForm UK. Досліджено вплив температурного режиму нагріву заготовки (950–1250 °C) на характер розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень у поперечному перерізі зони найбільших деформацій. Показано, що зміна температури практично не впливає на максимальні та мінімальні значення пластичної деформації, але суттєво знижує інтенсивність напружень і робить їх розподіл більш рівномірним. Розраховано коефіцієнт нерівномірності деформації K_n , за допомогою якого встановлено, що найбільш рівномірне формоутворення забезпечують режими 950 °C та 1150 °C. Результати мають практичне значення для оптимізації температурних режимів кування і зниження ризику утворення дефектів у криволінійній частині гака.

Ключові слова: згинання гаків, пластична деформація, інтенсивність напружень, температурний режим, коефіцієнт нерівномірності, напружено-деформований стан.

KOLISNYK K.

ANALYSIS OF THE INITIAL BENDING STAGE OF A HEAVY-DUTY SINGLE-HORN FORGED HOOK UNDER DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS

This study presents numerical simulation of the initial bending stage of a heavy-duty forged single-hook performed in the QForm UK software environment. The influence of the billet heating temperature (950–1250 °C) on the distribution of plastic strain and stress intensity in the cross-section of the zone with the highest deformation was investigated. The results show that temperature variation has almost no effect on the maximum and minimum values of plastic strain, but it significantly reduces the stress intensity and makes its distribution more uniform. The deformation non-uniformity coefficient (K_n) was calculated, revealing that the most uniform shape formation is achieved at 950 °C and 1150 °C. The findings are of practical importance for optimizing forging temperature regimes and reducing the risk of defect formation in the curved section of the hook.

Keywords: hook bending, plastic strain, stress intensity, temperature regime, non-uniformity coefficient, stress-strain state.

Вступ. Ковані гаки великої вантажопідйомності є відповідальними елементами вантажопідйомних механізмів, від надійності та довговічності яких безпосередньо залежить безпечна експлуатація обладнання та персоналу. Одним із ключових етапів технологічного процесу їх виготовлення є ковальська операція згинання, під час якої формується робоча геометрія гака та задаються його експлуатаційні характеристики.

Процес згинання супроводжується нерівномірним розподілом пластичної деформації та інтенсивності напружень, що може призвести до виникнення зон підвищених залишкових напружень, надмірного витягування волокон металу чи навіть зародження дефектів структури. Такі фактори безпосередньо впливають на якість поковки та подальшу працездатність гака в умовах дії змінних навантажень.

Особливу увагу слід приділяти початковому етапу згинання — зоні, розташованій поблизу хвостовика гака, де спостерігається складний напружено-деформований стан, спричинений максимальними деформаціями.

Для деталей великої маси важливим є раціональний вибір температурного режиму, що забезпечує необхідну пластичність металу при мінімальній нерівномірності деформаційного процесу.

У зв'язку з цим актуальним є числовий аналіз процесу згинання однорогих кованих гаків у зоні хвостовика з визначенням впливу температурного режиму на характер розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень з оцінкою нерівномірності формоутворення на початковій стадії згинання.

Літературний огляд. Виробництво кованих гаків великої вантажопідйомності зазвичай складається з послідовності ковальських операцій: підготовка заготовки, осаджування, протягування, кування заготовки і згинання [1]. Саме згинання формує перехідну зону біля хвостовика і робочу гілку гака. У сучасних дослідженнях пластичної деформації згинання розглядають як процес, у якому матеріал у зоні вигину працює по-різному: зовнішні волокна розтягуються, внутрішні — стискаються, а між ними проходить нейтральна лінія, де деформація майже відсутня. Для масивних кованих заготовок, таких як однорогі гаки, на розподіл деформації додатково впливають контакт з оправкою, сили тертя та тепловий обмін із інструментом. Ці фактори можуть зміщувати нейтральну лінію та змінювати форму течії металу. Особливо чутливою є перехідна зона біля хвостовика, де на ранніх етапах формування виникають деформації. Надалі вони можуть перерости у дефекти під час подальших операцій згинання або під дією робочих навантажень [2, 3].

Аналіз наукових джерел свідчить, що більшість досліджень кованих гаків зосереджена на формі поперечного перерізу та оцінці напружено-деформованого стану (НДС) готового виробу. Роботи [4, 5, 7, 9] показують, що форма та параметри перерізу істотно впливають на рівень максимальних напружень, а отже — на надійність гака. Дослідження [6, 8] підтверджують, що конструкційне вдосконалення кривизни та плавності переходів дозволяє істотно знизити максимальні напруження. Значний внесок у вивчення напружено-деформованого стану криволінійної частини гака зроблено в роботах [10, 11], де за допомогою методу скінченних елементів встановлено, що максимальні напруження фокусуються саме у зоні вигину та показали вплив геометрії гака на його міцність. Автори [12] виконали напружено-деформований та втомний аналіз кранових гаків, змінюючи матеріал конструкції. Робота показує, що найбільші максимальні напруження виникають у зоні кривизни, тобто саме там, де під час кування відбувається основне згинання заготовки. У роботі [13] виконано комплексний аналіз причин руйнування кранового гака вантажопідйомністю 24 т. Автори показали, що максимальні напруження у зоні кривизни, пов'язані з формою гака та характером деформацій під

час формування, стали основною причиною виникнення тріщин. Аналогічне дослідження [14] було проведено для причин руйнування С-подібного гака вантажопідйомністю 5 т.

© К.Д.Колісник. 2025

З'ясовано, що С-подібний гак вийшов з ладу через накопичення напружень у зігнутій частині в зоні хвостовика із слідами вібрації та неправильної термічної обробки.

Ці результати підкреслюють важливу роль якості формування кривої частини, яка у кованих однорогих гаків створюється на етапі згинання. Хоча ці роботи орієнтовані переважно на аналіз гаків після виготовлення, їхні висновки прямо стосуються і технологічної стадії згинання. Саме під час початкового формування кривизни, зокрема в зоні хвостовика, закладаються майбутні значення пластичної деформації, які надалі визначають поведінку гака під навантаженням.

Водночас, у літературі практично відсутні дослідження, що системно аналізують вплив температурного режиму згинання на нерівномірність температури та пластичної деформації. Тому моделювання процесу згинання з варіюванням температури, виконане у цій статті, є актуальним та заповнює важливу наукову прогалину, з умовами технологічного формоутворення.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення впливу початкової температури нагріву заготовки на нерівномірність розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень при ковальській операції згинання однорогих гаків великої вантажопідйомності за допомогою чисельного моделювання в програмному середовищі QForm UK [15]. Об'єктом дослідження є процес згинання кованого однорогого гака. Предметом дослідження є закономірності розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень при різних температурних режимах згинання.

Завдання дослідження:

- побудувати 3D-модель процесу згинання однорогого гака у програмному середовищі QForm;
- провести чисельне моделювання при різних температурах нагріву (950–1250 °С);
- проаналізувати розподіл пластичної деформації та інтенсивності напружень, оцінити їх нерівномірність;
- визначити раціональний температурний діапазон, який забезпечує найбільш рівномірний розподіл деформацій без зон перенапруження.

Викладення основного матеріалу та результати. У дослідженні розглянуто початкову стадію згинання однорогого кованого гака, на якій пряма заготовка вигинається навколо однієї осі. Перед згинанням заготовку попередньо нагрівають, що забезпечує необхідну пластичність металу та дає змогу виконувати деформацію без утворення тріщин і поверхневих дефектів. Завдяки нагріву заготовка легше деформується, а напружено-деформований стан металу під час формоутворення покращується.

Розміри заготовки залишилися незмінними для всіх варіантів моделювання, що дозволило оцінити вплив лише температурного фактора. Моделювання виконували для чотирьох температурних режимів нагріву: $t = 950; 1050; 1150; 1250$ °С, що дало змогу проаналізувати нерівномірність розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень, особливо в перехідній зоні біля хвостовика.

На рис. 1 зображено ескіз прямої стрижневої заготовки, з якої формується однорогий кований гак. Заготовка має змінний діаметр уздовж довжини, що відображено набором характерних ділянок: ліва частина — циліндрична ділянка діаметром $\varnothing 105$ мм. Далі заготовка розширюється до $\varnothing 300$ мм довжиною 700 мм, утворюючи плавний перехід. У центральній частині розташовано дві найбільші за перерізом ділянки діаметром $\varnothing 315$ мм, довжиною 600 мм. Після центральної зони заготовка звужується до діаметра $\varnothing 200$ мм на ділянці довжиною 500 мм. Права кінцева частина — відрізок довжиною 1080 мм, що закінчується технологічним торцем (фланцем), який використовується для утримання заготовки під час операції згинання.

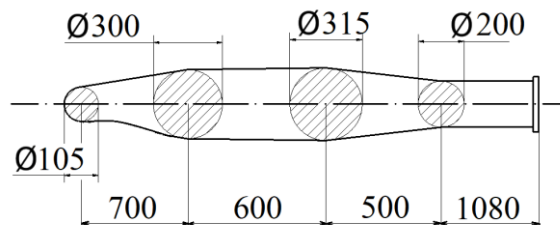


Рис. 1 – Ескіз прямої стрижневої заготовки гака перед операцією згинання

На рис. 2 представлено схему початкового етапу згинання заготовки однорогого гака. Пряма стрижнева заготовка розміщується між опорною плитою та верхнім рухомих пуансоном, виконаним у вигляді ролика. Згинання здійснюється під час опускання пуансона вниз, унаслідок чого заготовка деформується, утворюючи внутрішній радіус згину $R165$ та зовнішній $R485$. У нижній частині схеми показано стійку з двома опорними роликами, між якими розташовується заготовка під час процесу. Відстань між опорними роликами становить 1030 мм, що забезпечує необхідні умови для формування згину. Довжина робочої частини заготовки дорівнює

1700 мм. Відступ від точки прикладання навантаження (центра верхнього ролика) до правого торця заготовки становить 100 мм.

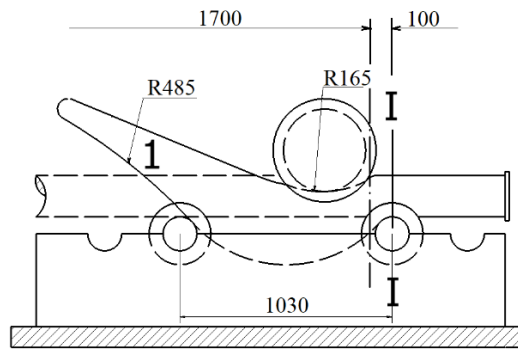


Рис. 2 - Схема першого етапу згинання заготовки

Параметри, які було задано для моделювання процесу згинання:

- матеріал заготовки - steel C22 (аналог сталь 20);
- температура заготовки – $t = 950; 1050; 1150; 1250$ °C;
- температура інструмента – $t = 200$ °C;
- хід інструмента – 190 мм;
- інструмент для згинання – пуансон, стійка з роликами (рис. 3)

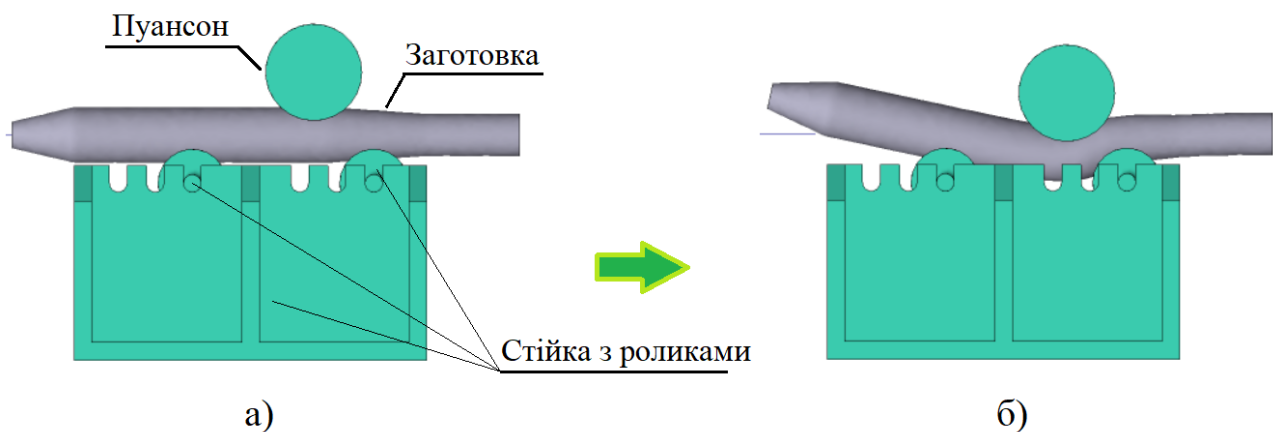


Рис. 3 - 3D-модель процесу згинання заготовки гака початкове положення заготовки перед згинанням (а) та положення заготовки після здійснення першого етапу згинання (б)

Для проведення порівняльного аналізу впливу температурного режиму було змодельовано чотири варіанти технологічного процесу згинання. У кожному варіанті змінювався лише початковий температурний стан заготовки — 950 °C, 1050 °C, 1150 °C та 1250 °C, тоді як усі інші параметри процесу згинання залишалися незмінними.

Аналіз результатів моделювання виконувався в поперечному перерізі А–А, який знаходиться у центральній частині зони найбільших деформацій криволінійної ділянки гака біля хвостовика. На рис. 4 наведено положення цього перерізу відносно деформованої заготовки після завершення початкового етапу згинання.

Для оцінки рівномірності розподілу пластичної деформації та інтенсивності напружень після операції згинання було застосовано метод прогнозування об'ємної нерівномірності деформації металу, запропонований у роботі [16].

Розраховано показник K_n для оцінки нерівномірності деформації, який характеризує співвідношення еквівалентної деформації в контрольних точках перерізу до її максимального значення в цьому ж перерізі. Оскільки максимальне значення приймається за одиницю, діапазон зміни показника K_n не перевищує 1. Для отримання даних у досліджуваному перерізі було задано чотири лінії, розташовані під кутом 45° одна відносно одної. На кожній лінії симетрично до центра перерізу та точки з максимальною еквівалентною деформацією було виділено сім контрольних точок (див. рис. 4).

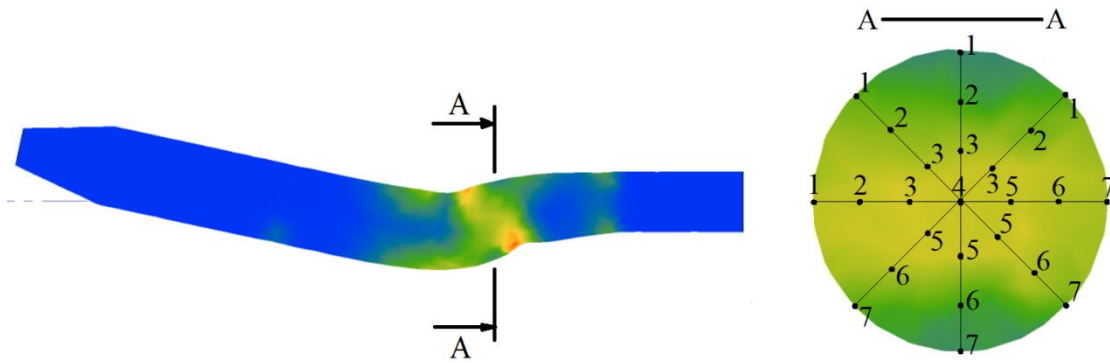


Рис. 4 - Схема розташування ліній та контрольних точок в поперечному перерізі заготовки після завершення початкового етапу згинання

На рис. 5 представлено розподіл пластичної деформації в поперечному перерізі заготовки після операції згинання для чотирьох температурних режимів: а) 950 °С; б) 1050 °С; в) 1150 °С; г) 1250 °С. На кожному полі кольорова шкала відображає величину пластичної деформації, а маркерами позначено положення точок з максимальними та мінімальними значеннями.

У всіх випадках характер розподілу деформації залишається подібним: максимальні значення знаходяться в центральній зоні перерізу, тоді як мінімальні — у приповерхневій області. Це зумовлено специфікою напружено-деформованого стану при згинанні, коли найбільші деформації зосереджуються в зоні активного зсуву та стиску.

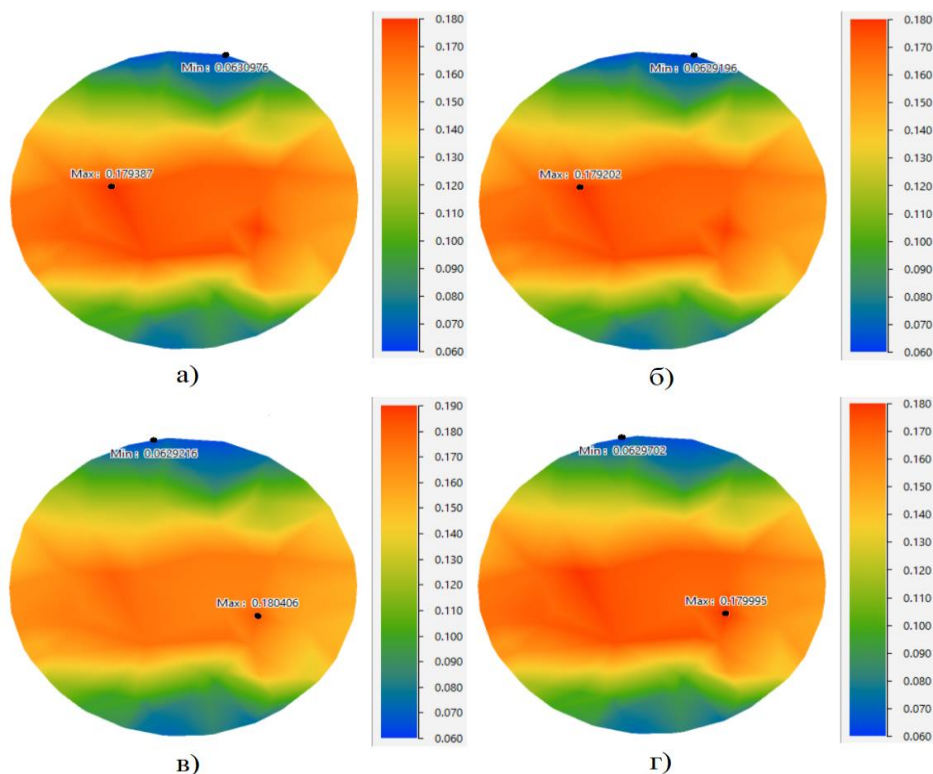


Рис.5 - Розподіл пластичної деформації в поперечному перерізі заготовки на першому етапі згинання при різних температурних режимах $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); $t = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в); $t = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (г)

При температурі 950 °С (рис. 5а) максимальна пластична деформація становить 0,179; а мінімальна — 0,063. Розподіл деформації має помітну різницю між зовнішньою та внутрішньою зонами згину. За температури 1050 °С (рис. 5б) характер розподілу залишається таким самим: максимальна деформація дорівнює 0,179; мінімальна — 0,063. При 1150 °С (рис. 5в) максимальна деформація дещо зростає до 0,18; а мінімальна залишається 0,063. Зі зростанням температури зона максимальних деформацій розширюється та витягується вздовж ширини перерізу заготовки, що вказує на більш рівномірний характер перетікання металу. За

температури 1250 °С (рис. 5г) значення знову становлять 0,179 та 0,063 відповідно. Розподіл стає більш плавним, проте співвідношення між зонами максимальної та мінімальної деформації зберігається.

У цілому, зміна температури практично не впливає на величину пластичної деформації, що свідчить про низьку чутливість цього параметра до температурного режиму на початковому етапі згинання. Водночас положення зон максимальних і мінімальних деформацій зміщується, що є важливим для оцінки нерівномірності деформування. Максимальні значення спостерігаються на зовнішньому радіусі згину (зона розтягнення), мінімальні — на внутрішньому радіусі (зона стискання), що є характерним для процесів згинання. Результати показників пластичної деформації та розрахунку коефіцієнта нерівномірності на першому етапі згинання при різних температурних режимах представлені у Таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати показників пластичної деформації та розрахунку коефіцієнта нерівномірності на першому етапі згинання при різних температурних режимах

Температурний режим t , °С	Мінімальне значення пластичної деформації ε_{\min}	Максимальне значення пластичної деформації ε_{\max}	Коефіцієнт нерівномірності деформації K_n , %
950	0,063	0,179	83
1050	0,063	0,179	72
1150	0,063	0,18	75
1250	0,063	0,179	72

На рис. 6 показано графіки розподілу коефіцієнта нерівномірності деформації K_n у семи контрольних точках, розташованих уздовж чотирьох вимірювальних ліній поперечного перерізу заготовки, для різних температур згинання: а) 950 °С; б) 1050 °С; в) 1150 °С; г) 1250 °С.

Для кожного температурного режиму було визначено узагальнене значення коефіцієнта нерівномірності деформації K_n . При температурі $t = 950$ °С (рис. 6а) значення K_n становить 83 %. Для режиму $t = 1050$ °С (рис. 6б) коефіцієнт зменшується до 72 %. За температури $t = 1150$ °С (рис. 6в) K_n становить 75 %, а при $t = 1250$ °С (рис. 6г) знову дорівнює 72 %. Якщо орієнтуватися лише на коефіцієнт нерівномірності деформації K_n , то більш раціональним є той режим, у якому K_n має значення наближене до одиниці, тобто де пластична деформація розподіляється найрівномірніше, у даному випадку найраціональніші режими — 950 °С та 1150 °С, але їхня різниця від режимів 1050 °С та 1250 °С не є суттєвою.

Для всіх температур спостерігається майже однакова закономірність: значення K_n зростає від крайніх до центральних точок перерізу. Найвищі значення припадають на середню зону (точки 3–5), після чого коефіцієнт зменшується. У крайніх точках (1 та 7) нерівномірність найбільша, тоді як у центральній точці 4 значення K_n для всіх чотирьох ліній збігаються. Це свідчить, що в центрі поперечного перерізу деформація є найбільш рівномірною.

Лінії 1 і 2 мають дещо більші значення K_n , ніж лінії 3 і 4, що пов'язано з особливостями напружено-деформованого стану в цих напрямках. Загальний вигляд графіків майже не змінюється при зміні температури, тому вплив температури на нерівномірність деформації на цьому етапі згинання є незначним.

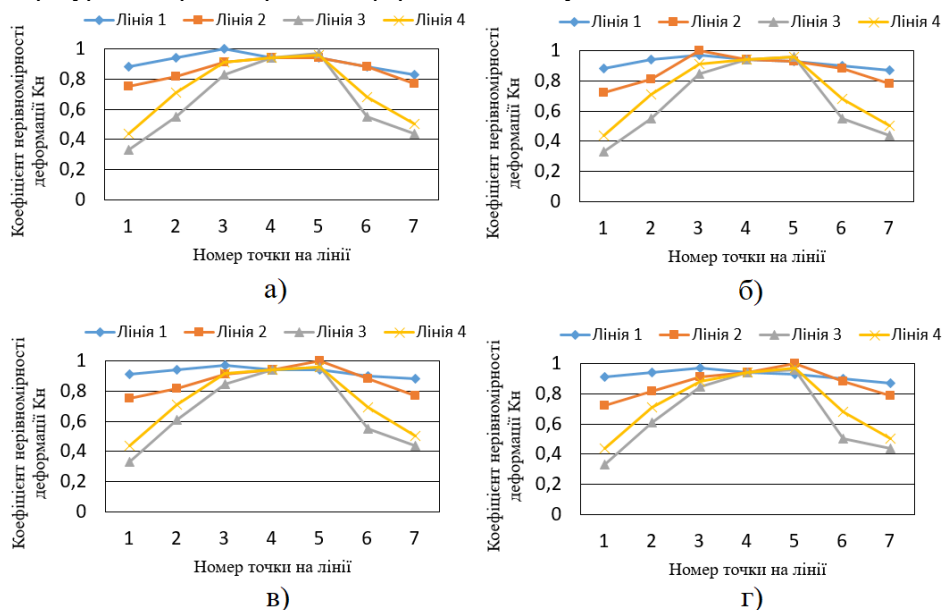


Рис. 6 – Графіки розподілу коефіцієнта нерівномірності деформації (K_n) у поперечному перерізі заготовки при згинанні з різними температурними режимами $t = 950$ °С (а); $t = 1050$ °С (б); $t = 1150$ °С (в); $t = 1250$ °С (г)

На рис. 7 показано розподіл інтенсивності напружень у поперечному перерізі заготовки після першого етапу згинання для чотирьох температурних режимів: а) 950 °С; б) 1050 °С; в) 1150 °С; г) 1250 °С.

У всіх випадках спостерігається характерний розподіл, максимальні значення напружень розташовані у зоні розтягнення (нижня частина перерізу — зовнішній радіус згину). Мінімальні значення знаходяться у зоні стиснення (верхня частина перерізу — внутрішній радіус згину).

При температурі 950 °С (рис. 7а) інтенсивність напружень має найбільший діапазон: мінімальне значення становить 51,3 МПа, а максимальне — 78 МПа. При температурі 1050 °С (рис. 7б) загальний рівень напружень знижується 40,6–62 МПа, а розподіл стає більш плавним порівняно з 950 °С. Зона максимальних значень стає компактнішою з температурою 1150 °С (рис. 7в), де напруження продовжують зменшуватися 32,4–49,2 МПа. Температура 1250 °С (рис. 7г) має найнижчий рівень напружень серед усіх режимів 25,3–38,5 МПа.

У міру підвищення температури інтенсивність напружень помітно зменшується, що є типовим для пластичної деформації. При цьому загальна форма розподілу не змінюється: максимальні напруження завжди знаходяться у зоні розтягнення, а мінімальні — у зоні стиснення. Крім того, з ростом температури напружений стан стає більш рівномірним, а градієнти напружень — менш різкими. Результати показників інтенсивності напружень та розрахунку коефіцієнта нерівномірності представлені у Таблиці 2.

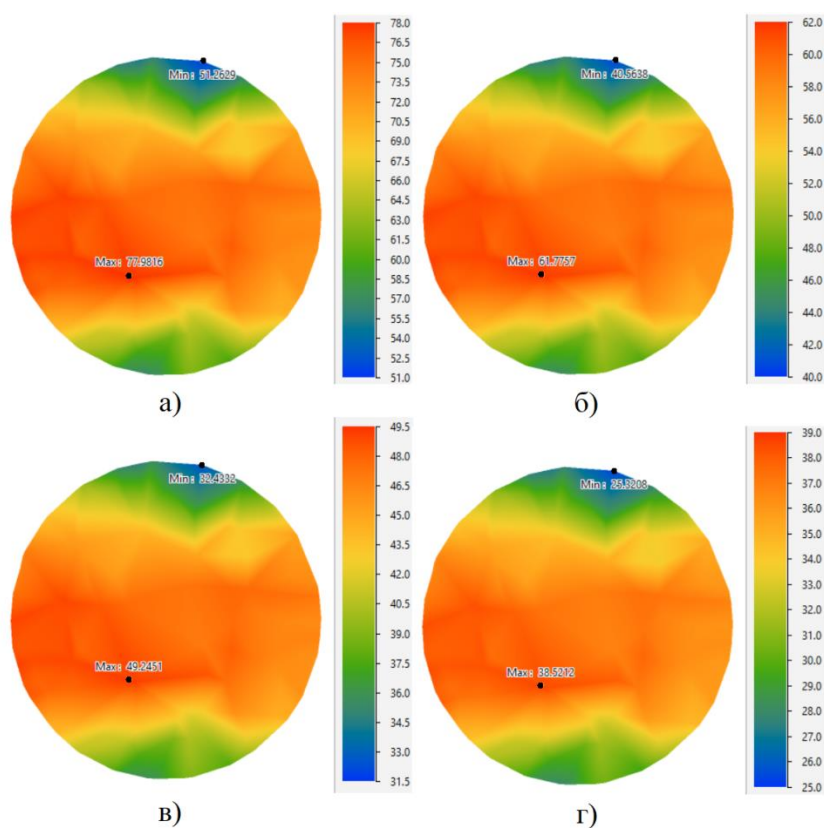


Рис. 8 - Розподіл інтенсивності напружень в поперечному перерізі заготовки на першому етапі згинання при різних температурних режимах $t = 950$ °С (а); $t = 1050$ °С (б); $t = 1150$ °С (в); $t = 1250$ °С (г)

Таблиця 2 – Результати показників інтенсивності напружень та розрахунку коефіцієнта нерівномірності на першому етапі згинання при різних температурних режимах

Температурний режим t , °С	Мінімальне значення інтенсивності напружень σ_i min, МПа	Максимальне значення інтенсивності напружень σ_i max, МПа	Коефіцієнт нерівномірності інтенсивності напружень K_n , %
950	51,3	78	75
1050	40,6	62	65
1150	32,4	49,2	65
1250	25,3	38,5	75

На рис. 9 показано залежність коефіцієнта нерівномірності інтенсивності напружень K_n від номера контрольної точки на чотирьох лініях у поперечному перерізі заготовки. Кожен графік (а–г) відповідає окремому температурному режиму згинання.

У всіх варіантах спостерігається подібна форма кривих: K_n зростає від крайніх точок до центральних, досягаючи максимальних значень у ділянці 4–5-ї точок, після чого дещо зменшується на протилежному боці перерізу. Це свідчить про характерний для згинання перерозподіл напружень — максимальні значення формуються в центральній зоні перерізу, а ближче до крайньої зони вони є нижчими.

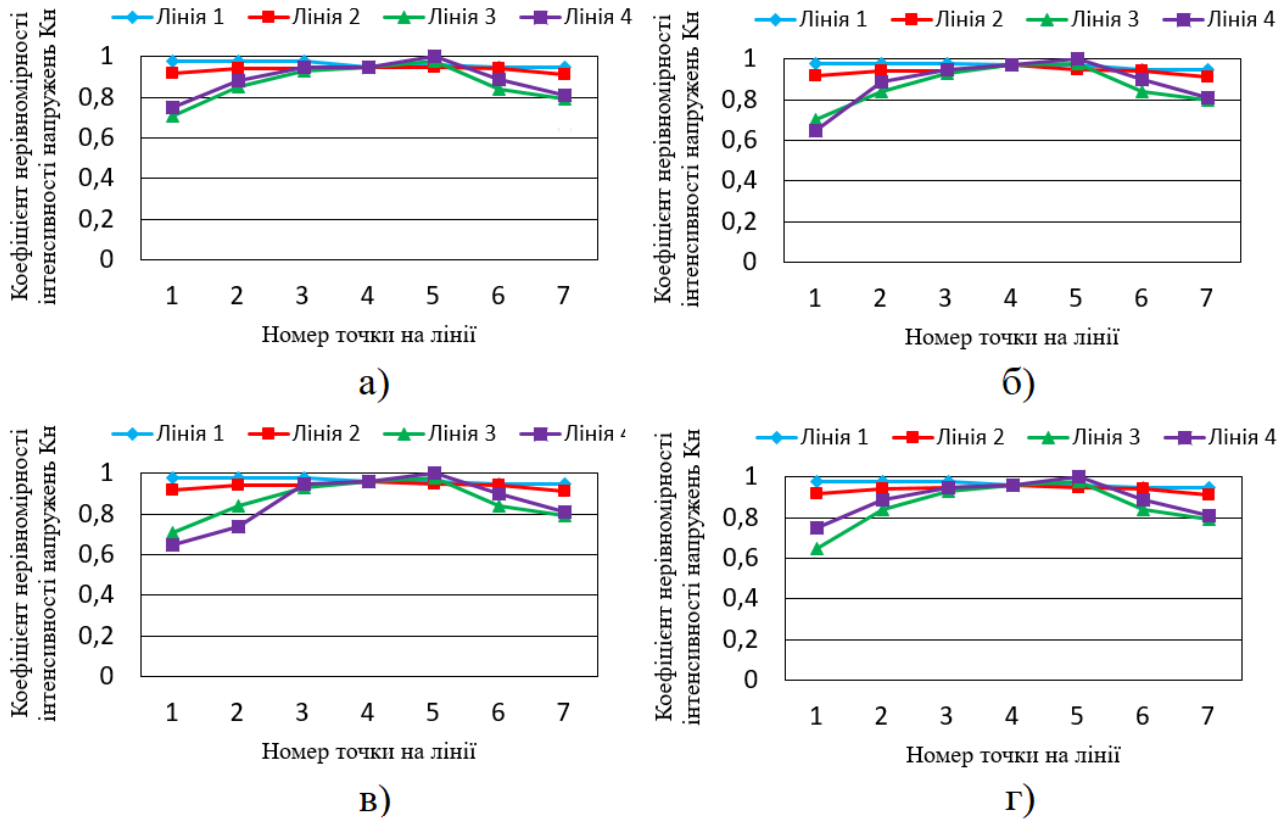


Рис. 9 – Графіки розподілу коефіцієнта нерівномірності інтенсивності напружень (K_n) у поперечному перерізі заготовки при згинанні з різними температурними режимами $t = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ (а); $t = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ (б); $t = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ (в); $t = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ (г)

Порівняння температур показує, що: $t = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 9а) – значення K_n на різних лініях досить близькі, а максимальні значення сягають приблизно 0,95–1. Розподіл є відносно рівномірним і має значення K_n 75 %. Температура $t = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 9б) – значення K_n становить 65 %, але криві вирівнюються ще більше, особливо в центральній частині перерізу, де значення ліній фактично збігаються. При температурі $t = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 9в) – розподіл залишається стабільним і близьким до рівномірного зі значенням K_n 65 %, хоча спостерігається дещо більша різниця між лініями в крайніх точках. Температура $t = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 9г) – показники також мають загальну тенденцію до вирівнювання, однак коливання між лініями стають помітнішими в крайніх точках, коефіцієнт нерівномірності K_n має значення 75 %.

Загалом рис. 9 відображає, що всі досліджені температурні режими забезпечують подібний характер розподілу інтенсивності напружень. Найрівномірніший розподіл (найменша різниця від 1 до мінімального значення) спостерігається при температурах $950 \text{ }^\circ\text{C}$ та $1250 \text{ }^\circ\text{C}$, тоді як при $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ та $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ нерівномірність дещо збільшується, переважно у крайніх точках перерізу.

Проведене дослідження показало, що зміна початкової температури нагріву заготовки практично не впливає на величину пластичної деформації, однак впливає на характер її розподілу. Максимальні деформації для всіх досліджених температур зосереджені на зовнішньому радіусі згину, мінімальні — на внутрішньому, що відповідає типовій картині напружено-деформованого стану при згинанні.

Зі зростанням температури зона максимальних деформацій дещо розширюється, а розподіл стає рівномірним. Узагальнені значення коефіцієнта нерівномірності K_n показали, що найменший рівень нерівномірності спостерігається при температурах $950 \text{ }^\circ\text{C}$ та $1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Інтенсивність напружень, на відміну від деформації, суттєво залежить від температури. При підвищенні температури рівень напружень зменшується, що вказує на покращення умов формоутворення. У цілому,

раціональним з погляду рівномірності деформування та мінімізації напружень є температурний діапазон 950–1150 °С.

Висновки.

Температура нагріву заготовки має суттєвий вплив на рівень інтенсивності напружень. Для всіх досліджених інтервалів температур мінімальні та максимальні значення пластичної деформації залишаються практично незмінними (0,063 та 0,179–0,18 відповідно). Це свідчить про низьку чутливість параметра пластичної деформації до температури на початковому етапі згинання.

Характер розподілу деформації залишається однаковим для всіх режимів: максимальні значення фіксуються на зовнішньому радіусі згину (зона розтягнення), мінімальні — на внутрішньому (зона стискання). З підвищенням температури зона максимальних деформацій дещо розширюється, що свідчить про більш рівномірне перетікання металу.

Коефіцієнт нерівномірності деформації K_n демонструє помірну зміну із температурою. Найвищу рівномірність деформації отримано при температурах: 950 °С — 83 %, 1150 °С — 75 %. Режими 1050 °С та 1250 °С показали нижчу рівномірність (72 %), але різниця між режимами є невеликою.

Інтенсивність напружень суттєво зменшується зі збільшенням температури. Діапазон напружень зменшується від 78–51 МПа (950 °С) до 38–25 МПа (1250 °С), що є характерним для пластичної деформації. Вищі температури сприяють більш плавному розподілу напружень та зменшенню різких перепадів.

Характер напружено-деформованого стану залишається типовим для процесів згинання: максимальні напруження виникають у зоні розтягнення, мінімальні — у зоні стискання, незалежно від температури.

Раціональними температурними режимами попереднього нагріву є 950 °С та 1150 °С, оскільки вони забезпечують: вищу рівномірність деформації (максимальний K_n) та помірний рівень напружень.

Загалом дослідження показало, що температура нагріву впливає переважно на рівень інтенсивності напружень і плавність їхнього розподілу, тоді як розподіл пластичної деформації залишається стабільним і мало залежить від температури, що важливо для подальшого конструювання технологічних режимів.

Список літератури:

1. Чухліб В. Л., Колісник К. Д. Аналіз та дослідження технології кування гаків // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні — 2024. — С. 87–93.
2. Riháček J., Barták J., Podaný K. Numerical analysis and optimization of the hook forging process // *Manufacturing Modelling, Materials and Metrology*. — 2021. — June. — P. 4356–4361.
3. A Review on Design, Selection of Material, Analysis and Failure of Hooks used in Material Handling Equipment / S. K. Mahajan // *International Journal of Engineering Research & Technology*. — 2023. — Vol. 9, No. 5. — P. 28–37.
4. Dipu N. H., Apu M. H., Chowdhury P. P. Identification of the effective crane hook's cross-section by incorporating finite element method and programming language // *Heliyon*. — 2024. — P. 1–14.
5. Pavlović G. V., Savković M., Zdravković N., Marković G. Optimization of crane hooks considered as curved beams with different cross-sections – a comparative study using MATLAB // *Proceedings of the XXIII International Conference MHCL 2019, FME Belgrade, September 18th - 20th, 2019*. — P. 59–64.
6. Dumitriu D., Ionescu M., Rugina C. Hook crane shape design improvement for reducing the maximum stress // *Journal of Technical Sciences – Applied Mechanics*. — 2023. — Vol. 68, № 1. — С. 19–39.
7. Shrestha B., Bhandari A., Poudel S., Rao K. V. Crane hook analysis for different cross-section using ANSYS // *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)*. — 2019. — Vol. 5, No. 12. — P. 67–73.
8. Desai N., Zeytinoglu N. Design and optimization of the geometric properties of a crane hook // *World Journal of Engineering and Technology*. — 2016. — Vol. 4, No. 3. — С. 391–397. — DOI: 10.4236/wjet.2016.43038.
9. Вплив форми кованого однорогого гака на його ефективність / Г. Д. Портнов, А. А. Тихий, В. В. Дарієнко, В. В. Пукалов // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : Зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – Вип. 4 (35). – с. 127 – 133.*
10. Fetvacı M. C., Gerdemeli I., Erdil A. B. Finite element modelling and static stress analysis of simple hooks // *Proceedings of the 10th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” (TMT 2006). Barcelona–Lloret de Mar, Spain, 11–15 September 2006*. P. 797–800.
11. Molnár D., Blatnický M., Dižo J. Design and strength analysis of a crane hook with a 500 kg lifting capacity. *Perner's Contacts*. 2021. Vol. 16, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.46585/pc.2021.2.1702>
12. Zade M. R. Finite element analysis and fatigue analysis of crane hook with different materials // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. — 2017. — Vol. 4, Issue 1. — P. 1429–1436. — e-ISSN 2395-0056; p-ISSN 2395-0072.
13. Kishore K., Sanjay Gujre V., Choudhary S., Sanjay Gujre A., Vishwakarma M., Thirumurgan T., Choudhury M., Adhikary M., Kumar A. Failure analysis of a 24 T crane hook using multi-disciplinary approach // *Engineering Failure Analysis*. — 2020. — № 104666. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104666>
14. Vara Prasad G., Nair S. Failure investigation of 5T C-hook of EOT crane // *AIP Conference Proceedings*. — 2024. — Vol. 3231. — Article 020001. — DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0236758>.
15. QForm UK. (2025). <https://www.qform3d.com/>
16. Чухліб В. Л., Ашкелянець А. В., Губський С. О., Петров О. В., Дуванський О. М., Палієнко В. О., Окунь А. О. Розробка технологічної концепції проектування процесів кування з урахуванням впливу режиму деформування на якість поковок. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. 2021. № 1. С. 95–103.

Bibliography (transliterated):

1. Chukhlib V. L., Kolisnyk K. D. Analiz ta doslidzhennia tekhnolohii kuvannia hakiv // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni — 2024. — S. 87–93.
2. Riháček J., Barták J., Podaný K. Numerical analysis and optimization of the hook forging process // Manufacturing Modelling, Materials and Metrology. — 2021. — June. — P. 4356–4361.
3. A Review on Design, Selection of Material, Analysis and Failure of Hooks used in Material Handling Equipment / S. K. Mahajan // International Journal of Engineering Research & Technology. — 2023. — Vol. 9, No. 5. — P. 28–37.
4. Dipu N. H., Apu M. H., Chowdhury P. P. Identification of the effective crane hooks cross-section by incorporating finite element method and programming language // Heliyon. — 2024. — P. 1–14.
5. Pavlović G. V., Savković M., Zdravković N., Marković G. Optimization of crane hooks considered as curved beams with different cross sections – a comparative study using MATLAB // Proceedings of the XXIII International Conference MHCL 2019, FME Belgrade, September 18th - 20th, 2019. — P. 59-64.
6. Dumitriu D., Ionescu M., Rugina C. Hook crane shape design improvement for reducing the maximum stress // Journal of Technical Sciences – Applied Mechanics. — 2023. — Vol. 68, № 1. — S. 19–39.
7. Shrestha B., Bhandari A., Poudel S., Rao K. V. Crane hook analysis for different cross-section using ANSYS // International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE). — 2019. — Vol. 5, No. 12. — P. 67–73.
8. Desai N., Zeytinoglu N. Design and optimization of the geometric properties of a crane hook // World Journal of Engineering and Technology. — 2016. — Vol. 4, No. 3. — S. 391–397. — DOI: 10.4236/wjet.2016.43038.
9. Vplyv formy kovanoho odnorohoho haka na yoho efektyvnist / H. D. Portnov, A. A. Tykhyi, V. V. Dariienko, V. V. Pukalov // Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky : Zb. nauk. pr. – Kropyvnytskyi : TsNTU, 2021. – Vyp. 4 (35). – s. 127 – 133.
10. Fetvaci M. C., Gerdemeli I., Erdil A. B. Finite element modelling and static stress analysis of simple hooks // Proceedings of the 10th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” (TMT 2006). Barcelona–Lloret de Mar, Spain, 11–15 September 2006. P. 797–800.
11. Molnár D., Blatnický M., Dižo J. Design and strength analysis of a crane hook with a 500 kg lifting capacity. Pernal Contacts. 2021. Vol. 16, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.46585/pc.2021.2.1702>
12. Zade M. R. Finite element analysis and fatigue analysis of crane hook with different materials // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). — 2017. — Vol. 4, Issue 1. — P. 1429–1436. — e-ISSN 2395-0056; p-ISSN 2395-0072.
13. Kishore K., Sanjay Gujre V., Choudhary S., Sanjay Gujre A., Vishwakarma M., Thirumurgan T., Choudhury M., Adhikary M., Kumar A. Failure analysis of a 24 T crane hook using multi-disciplinary approach // Engineering Failure Analysis. — 2020. — № 104666. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104666>
14. Vara Prasad G., Nair S. Failure investigation of 5T C-hook of EOT crane // AIP Conference Proceedings. — 2024. — Vol. 3231. — Article 020001. — DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0236758>.
15. QForm UK. (2025). <https://www.qform3d.com/>
16. Chukhlib V. L., Ashkelianets A. V., Hubsykyi S. O., Petrov O. V., Duvanskyi O. M., Paliienko V. O., Okun A. O. Rozrobka tekhnolohichnoi kontseptsii proektuvannia protsesiv kuvannia z urakhuvanniam vplyvu rezhymu deformuvannia na yakist pokovok. Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Hydraulic machines and hydraulic units. 2021. № 1. S. 95–103.

Відомості про авторів / About the Authors

Колісник Костянтин Дмитрович (Kolisnyk Kostiantyn) - аспірант кафедри "Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: kolesnik2195@gmail.com.