

Т.О. Пригоровська, асист.  
Л.Я. Роп'як, к.т.н., с.н.с., доц.  
І.С. Когут, інж.  
В.Г. Панчук, д.т.н., проф.  
Л.О. Борушак, к.т.н., доц.  
І.О. Шуляр, к.т.н., доц.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

## Дослідження напруженого стану литої заготовки лопатевого долота

*Створена твердотільна модель лопатевого долота та ливарної форми. Досліджено процес заливання розтопленої сталі у кокіль. Вивчено характер розподілу залишкових напружень у різних перерізах заготовки лопатевого долота. Встановлено, що найбільш високий рівень залишкових напружень виникає в основі паза заготовки між лопатями. Запропоновано шлях зменшення рівня залишкових напружень у заготовці лопатевого долота, який полягає у проведенні відпалу заготовки.*

**Ключові слова:** заготовка; вилівок; ливарна форма; залишкові напруження; комп'ютерне моделювання; лопатеве долото.

**Постановка проблеми.** Породоруйнівний інструмент є головним елементом бурового обладнання, оскільки здійснює процес руйнування гірської породи. Бурові долота працюють за високих статичних і динамічних навантажень, крутного моменту, в умовах агресивного корозійного середовища – абразивовмісної рідини, що рухається під високим тиском та значних температур, що виникають в зоні тертя. Від якості виготовлення бурового інструменту залежать його експлуатаційні характеристики. Останнім часом безопорні долота з полікристалічними алмазно-твердосплавними різцями (PDC) широко використовують для буріння свердловин на нафту, газ і воду тощо. Вказаний тип доліт витісняє шарошкві долота завдяки більш високій зносостійкості PDC-різців, відсутності складного вузла підшипникових опор та рухомих елементів у конструкції, а також ремонтпридатності. Крім того, застосування безопорних доліт забезпечує вищу механічну швидкість буріння, підвищену проходку інструменту, потребує виконання меншої кількості спускально-піднімальних операцій, що знижує собівартість одного метра проходки, а також скорочує час на відкриття пласта та збереження колекторських властивостей продуктивного горизонту [1].

Показники відпрацювань бурових доліт, в першу чергу, залежать від якості бурового інструменту та його технічних характеристик, що підтверджується всім світовим досвідом, де роботи з вдосконалення експлуатаційних і технологічних рішень щодо його виготовлення не припиняються. Довговічність і надійність доліт, в основному, залежить від технологічного забезпечення їх виготовлення ще на стадії отримання заготовки, саме тому роботи, присвячені проблемам підвищення довговічності бурового інструменту, є актуальними, мають наукове і практичне значення.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Заготовки корпусів бурових доліт виготовляють методами порошкової металургії шляхом спікання твердого сплаву або литва у піщано-земляні або металеві форми для отримання цих заготовок корпусів зі сталі, а також в умовах одиничного виробництва – з прокату.

Метод відцентрового литва [2] дозволяє отримувати сталеві заготовки із високими фізико-механічними властивостями, в тому числі біметалеві та армовані [3-5], які практично неможливо одержувати іншими методами литва.

Застосовуючи широкий спектр сучасних матеріалів – сталей, кольорових металів, твердих сплавів і мінералокераміки, а також змінюючи вхідні параметри технологічного процесу, можна отримувати композиційні заготовки різної форми, розмірів та властивостей. Точність і якість отримання заготовок при відцентровому литві залежать від точності ливарної машини, точності виготовлення виливниці та її балансування, точності закріплення виливниці на передньому кінці шпинделя ливарної машини, а також від технологічних параметрів процесу відцентрового литва та просторового розміщення осі обертання шпинделя (горизонтальне, вертикальне, похиле) [5, 6]. На властивості заготовки впливають такі основні технологічні параметри [2, 3, 6–8]: швидкість обертання форми; температура виливниці; наявність теплоізоляційного покриття на внутрішній поверхні виливниці; температури розтопленого металу, що заливають у виливницю, дозування металу, швидкість заливання металу та швидкість подачі армуючих частинок у виливницю; температура підігріву і розміри армуючих частинок. Тому при виготовленні відцентровим литвом вилівок основним напрямком покращення якості виробів є вдосконалення

технології виготовлення, в тому числі і за рахунок використання сучасних систем комп'ютерного моделювання [7, 8].

В роботах [9, 10] дослідили процеси відцентрового лиття листопрокатних валків – гладких циліндричних деталей з циліндричними східками. У праці [11] дослідили ступінь напруженого стану біметалевих валків для прокатних станів.

Відомо, що залишкові напруження, які виникають у виливку, погіршують його якість. Вказані напруження у заготовці також можуть істотним чином впливати на точність виготовлення деталі, що визначатиме експлуатаційні властивості всього виробу.

Проведений аналіз наукової та патентної літератури свідчить, що автори, в основному, зосереджувались на вивченні технологічних параметрів процесу литва, кристалізації виливок та визначенні залишкових напружень у гладких циліндричних деталях, однак, практично відсутні відомості про напружений стан у заготовках складної форми, до яких належать лопатеві долота.

**Мета роботи** полягає у дослідженні процесу отримання литих заготовок лопатевих доліт, визначенні рівня внутрішніх залишкових напружень та характеру розподілу цих напружень у тілі заготовки засобами комп'ютерного моделювання.

**Викладення основного матеріалу.** Як програмне забезпечення для побудови твердотільної 3D-моделі виливки вибирали CAD-систему SolidWorks – продукт компанії SolidWorks Corporation, який являє собою систему автоматизованого проектування, інженерного аналізу та підготовки виробництва для виробів будь-якої складності й призначення.

Процес побудови 3D-моделі в середовищі SolidWorks базується на створенні об'ємних геометричних елементів і виконанні різних операцій над ними. Модель виливка і форми показані на рисунку 1.

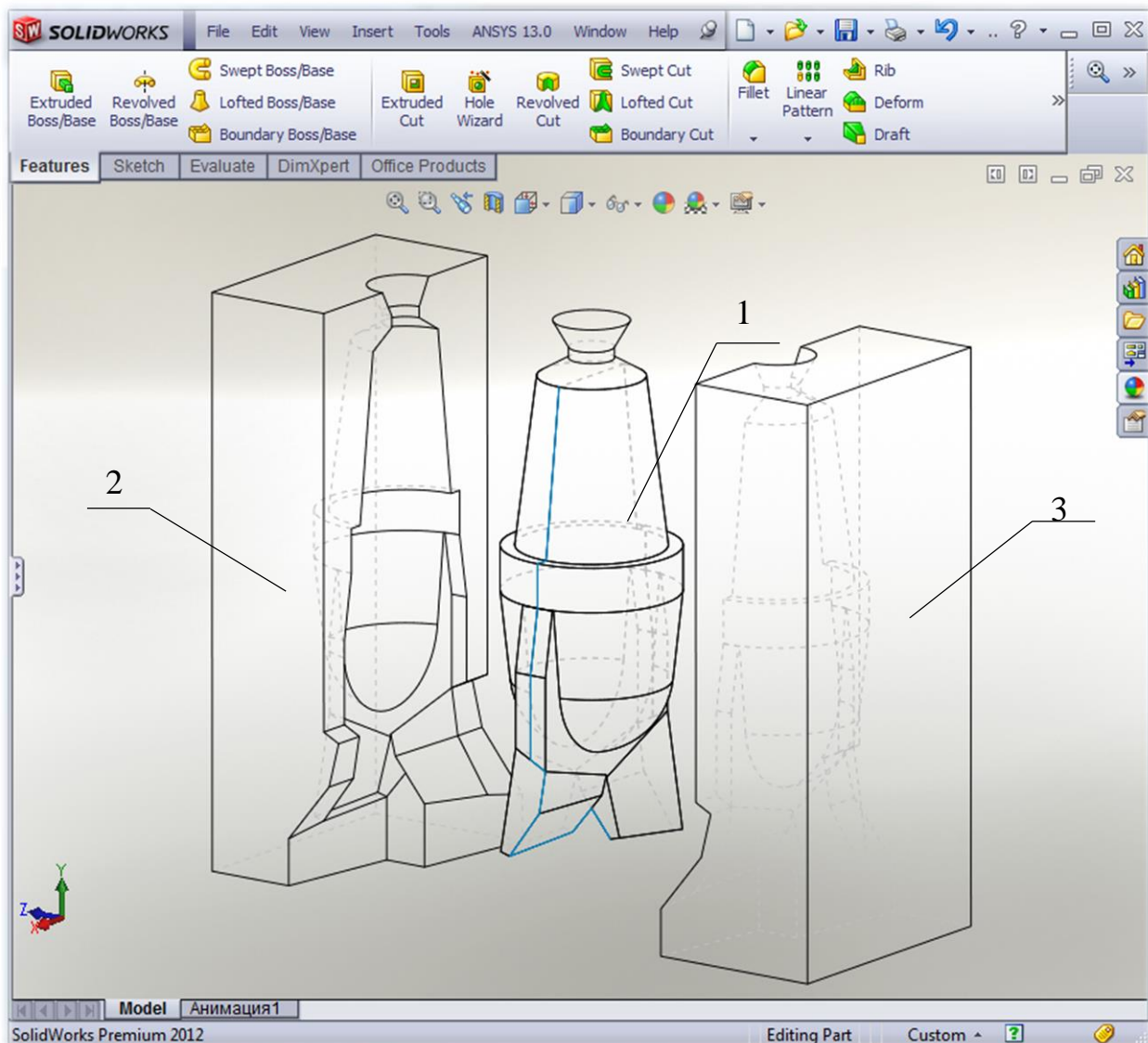


Рис. 1. Схема заготовки лопатевого долота (1) та елементів кокля (2, 3) у рознесеному вигляді

Ливарну форму в SolidWorks будували за допомогою інструментів, спеціально призначених для побудови цих форм, які забезпечують гарантовану відсутність інтерференції під час складання збірки, що є дуже важливим при проведенні досліджень для складних за формою заготовок. У результаті всіх побудов отримали 3D-модель вилівка і форми, які експортувалися в програму ProCast.

Після генерації кінцево-елементної сітки в програмі (рис. 2) починається підготовка до розрахунку. Суть підготовки полягає у присвоєнні елементам розрахункової області властивостей (теплових, усадочних, деформаційних та ін.), складу необхідних матеріалів та задання граничних і початкових умов.

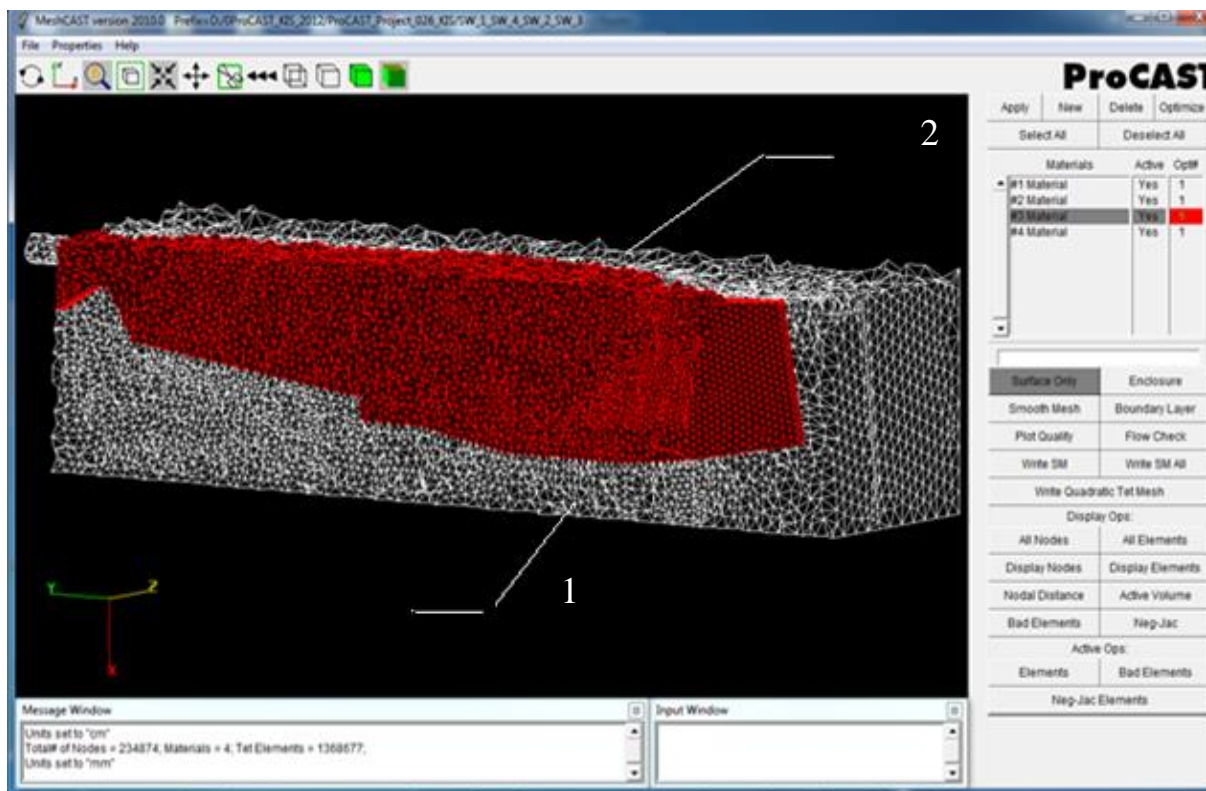


Рис. 2. Генерація просторової сітки в системі Pro-Cast:  
1 – заготовка лопатевого долота; 2 – елемент кокілю

Наступними кроками моделювання були: вибір матеріалів (табл. 1), створення контактних поверхонь між компонентами і призначення їхніх типів, встановлення значення коефіцієнта тепловіддачі для кожної контактної поверхні, встановлення граничних умов (тиск, швидкість, температура, вага).

Додали в базу даних матеріалів ProCAST новий матеріал – сталь 20ХН, хімічний склад якої подано в таблиці 1, згідно з ГОСТ 4543 – 71, а її фізико-механічні властивості – в таблиці 2.

Таблиця 1

Хімічний склад у % (вагові) сталі 20ХН за ГОСТ 4543 – 71

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,20	0,27	0,55	1,20	0,03	0,03	0,60	0,30

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості сталі 20ХН за ГОСТ 4543 – 71

$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж / см <sup>2</sup>
590	780	14	50	78

Описуємо цей процес для вибраного матеріалу вилівка – сталь 20ХН. Для заливання розтопленої сталі у форму використали модуль програми Fluids Module (рис. 3). За кольірною шкалою в градусах Цельсія (°C), яка розташована на рисунку зліва контролювали температуру рідкого сплаву. Перебіг заповнення вилівка зображено на рис. 3. Модуль розрахунку залишкових напружень дозволяє обчислювати як термічні напруження, так і напруження, що виникають при взаємодії вилівка з формою та іншою технологічною оснасткою. Залишкові напруження розраховуються у вилівку за пружно-в'язкопластичною моделлю, а ливарну форму (кокілю) для спрощення досліджень задавали як абсолютно жорстке тіло. Програма також має спеціальний алгоритм для визначення контактної взаємодії між

виливком і формою. Модуль розрахунку напружень дозволяє розраховувати залишкові напруження, пластичні деформації, «терсічні» тріщини і отримувати кінцеву форму вилівка з урахуванням деформацій та діючих залишкових напружень. Зміну величини ефективних напружень вилівку в часі зображено на рис. 4.

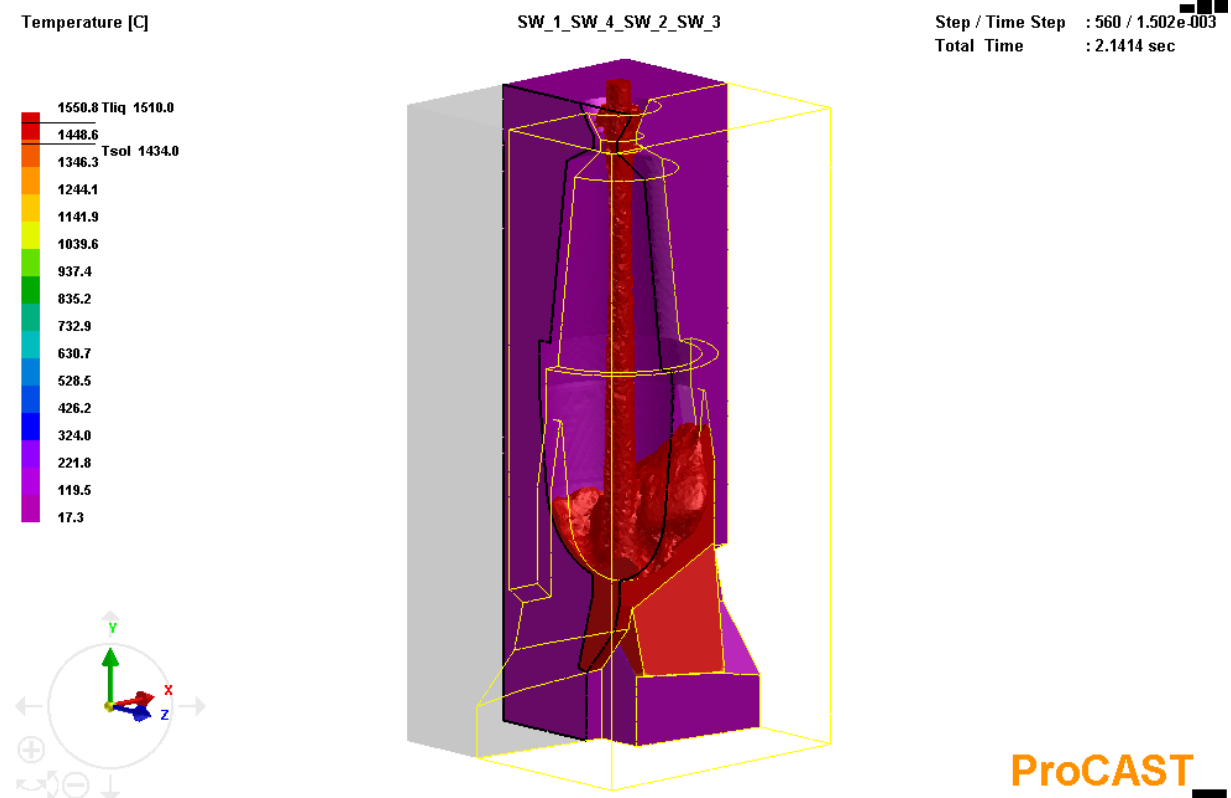


Рис. 3. Схема заливання форми розтопленою сталлю в момент часу 2,1414 с

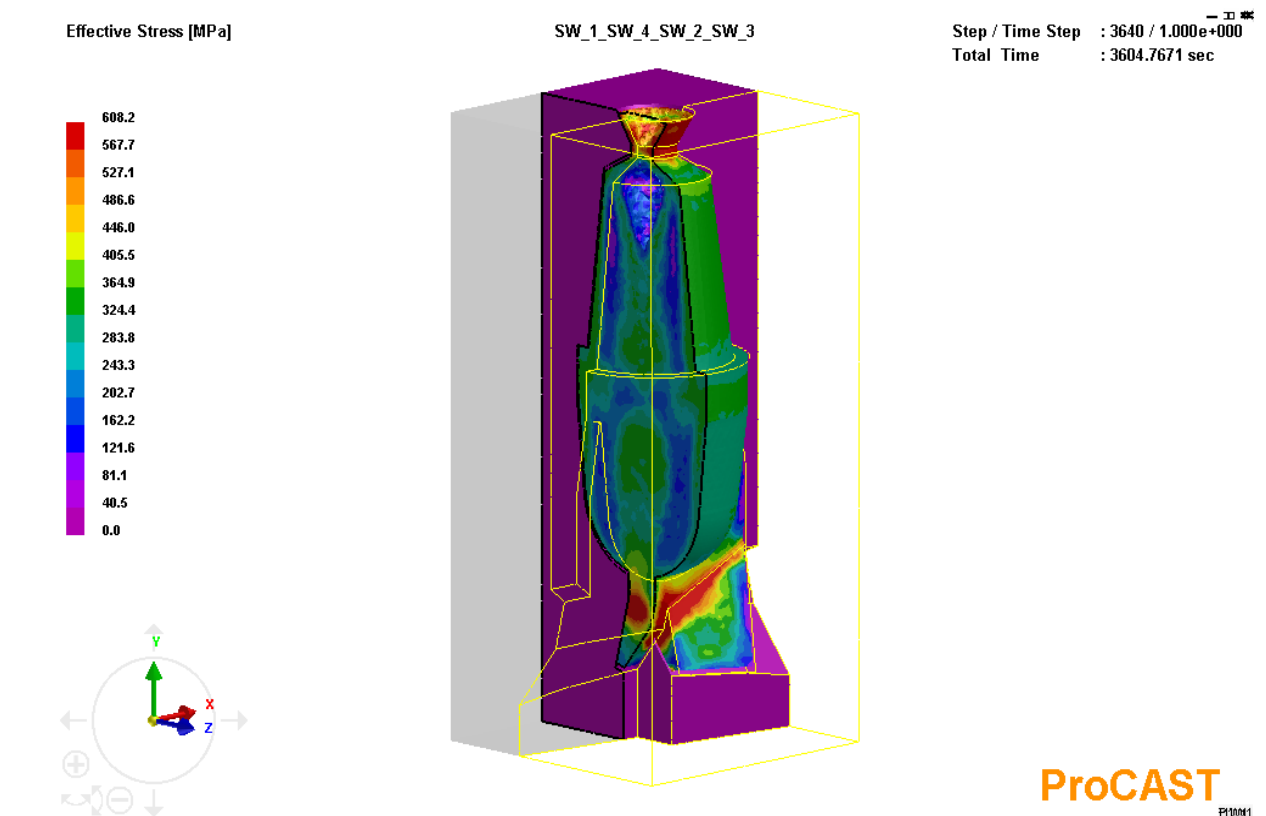


Рис. 4. Залишкові напруження в тілі вилівка в момент часу 3605 с.

Із рисунка 4 видно, що найменший рівень залишкових напружень у виливку виникає на зовнішньому ребрі меншої основи конуса замкової нарізі, середній – на криволінійних ділянках спряження лопаті із циліндричною частиною виливка найменшої товщини, а найбільший рівень цих напружень спостерігається в основі паза між лопатями заготовки.

Відмітимо, що мінімальний рівень залишкових ливарних напружень досягається на зовнішньому ребрі меншої основи конуса замкової нарізі та становить 270 МПа, а проміжне значення досягається в точці початку спряження лопаті із сферичною частиною виливка і складає 330 МПа.

Із рис. 4 також видно, що максимальний рівень залишкових напружень становить 608 МПа в основі паза заготовки між лопатями, який, практично близький до  $\sigma_{0,2} = 590$  МПа матеріалу виливка (сталь 20ХН). Такий рівень залишкових ливарних напружень не спричиняє виникнення ливарних тріщин заготовки. Для усунення цих залишкових напружень слід застосувати операцію термічної обробки – відпал або оптимізувати конфігурацію ливарної форми. Для підвищення ресурсу роботи кокіля та покращення умов кристалізації виливка на робочій поверхні цього кокіля доцільно сформувати оксидне покриття, наприклад шляхом напилення алюмінію з подальшим оксидування його верхнього шару в електроліті в режимі мікродугових розрядів.

На рис. 5 показано графічні залежності зміни ефективних напружень за часом у виливку.

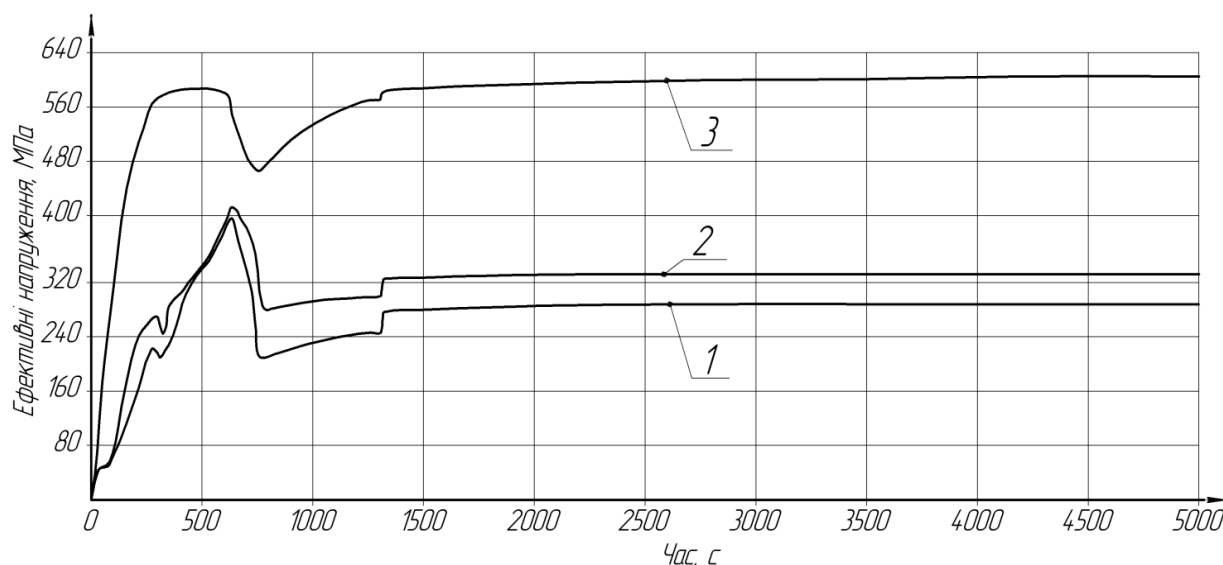


Рис. 5. Залежність зміни ефективних напружень у найбільш характерних точках тіла виливка від часу:

1 – точка на зовнішньому ребрі меншої основи конуса замкової нарізі;

2 – початок контуру лопаті на корпусі долота; 3 – основа паза між лопатями заготовки

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 5 показав зростання рівня напружень в процесі кристалізації металу виливка у всіх досліджуваних точках. Слід зазначити, що у початковий момент кристалізації заготовки спостерігається різке зростання рівня залишкових напружень у всіх точках виливка приблизно на протязі 500 с, далі рівень напружень дещо спадає – біля 1000 с, і стабілізується при подальшому затвердінні виливка після 1700 с. Це можна пояснити структурними перетвореннями, які відбуваються у виливку, в процесі його кристалізації у всьому тілі заготовки.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Комп'ютерне моделювання процесу отримання литої заготовки лопатевого долота дозволило досить детально проаналізувати процес заповнення форми рідкою сталлю та оцінити рівень внутрішніх залишкових напружень у будь-якій точці тіла заготовки.

Програмне забезпечення ProCAST дозволяє проводити комплексне моделювання ливарного процесу і виявляти основні дефекти у заготовці, характер усадки, напружено-деформований стан ще на стадії створення технології отримання заготовок. Такий підхід дозволяє суттєво скоротити час на проектування технологічного процесу литва, економити матеріали, а також проводити оптимізацію процесу шляхом створення пробних партій виливок.

Встановлено зону концентрації максимальних залишкових напружень у тілі виливка в основі паза між лопатями. Запропоновано покращити напружений стан, застосовувавши термічну операцію – відпал для зниження рівня цих напружень.

Проведення подальших досліджень планується в напрямку оптимізації технологічних параметрів процесу отримання заготовок для багатолопатевого доліт.

## Список використаної літератури:

1. Pryhorovska T.O. Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement / T.O. Pryhorovska // *Machining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 21, Issue 1. – Pp. 37–66. – Access mode : <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2016.1260429>.
2. Юдин С.Б. Центробежное литье / С.Б. Юдин, М.М. Левин, С.Е. Розенфельд. – М. : Машиностроение, 1972. – 360 с.
3. Бугай Ю.Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент / Ю.Н. Бугай, И.В. Воробьев. – Львов : Вища школа : Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 205 с.
4. А. с. 1001573 СССР, МКИ В 22 D 19/02. Способ получения армированных отливок / Ю.Н. Бугай, Э.Б. Милевский, Р.Т. Карпик, И.О. Загайдук и др. – № 3216252/22-02 ; заявл. 15.12.80. – 8 с.
5. Пат. 72194 Україна, МПК В 22 D 13/02. Машина для відцентрового литва та армування виливків / І.О. Шуляр, Л.О. Борушак, С.Л. Борушак. – № 201200992 ; заявл. 31.01.12 ; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.
6. Шуляр І.О. Технологія та устаткування для отримання армованих виливків відцентровим литвом із змінним положенням осі обертання форми / І.О. Шуляр, Л.О. Борушак, В.Г. Панчук // Науковий Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2012. – № 2 (10 Е). – С. 154–163.
7. Шуляр І. Дослідження руху твердих частинок у рідкому сплаві при відцентровому армуванні з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми / І.Шуляр, М.Маковійчук, Л.Роп'як // Наукові нотатки. – Луцьк, 2013. – № 40. – С. 321–330.
8. Роп'як Л.Я. Вплив технологічних параметрів процесу відцентрового армування на показники якості деталей / Л.Я. Роп'як, І.О. Шуляр, О.М. Богаченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 1, № 5 (79). – С. 53–62.
9. Жижкина Н.А. Центробежное литье листопркатных валков : монография / Н.А. Жижкина. – Брянск : БГТУ, 2016. – 180 с.
10. Серебряков С.П. Особенности центробежного литья с вертикальной осью вращения / С.П. Серебряков, Я.В. Фролов, Б.В. Фокин // Литейное производство. – 2007. – № 1. – С. 18–20.
11. Будагьянц Н.А. Поиск методов определения степени напряженного состояния биметаллических валков для непрерывных тонколистовых прокатных станов / Н.А. Будагьянц, Н.А. Жижкина, В.И. Кондратенко // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : СТУ, 2000. – С. 98–103.

## References:

1. Pryhorovska, T.O. (2017), «Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement», *Machining Science and Technology*, Vol. 21, Issue 1, pp. 37–66, available at: <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2016.1260429>
2. Judin, S.B., Levin, M.M. and Rozenfel'd, S.E. (1972), *Centrobezhnoe lit'e*, Mashinostroenie, Moskva, 360 p.
3. Bugaj, Ju.N. and Vorob'ev, I.V. (1989), *Centrobezhno-armirovannyj porodorazrushajushhij burovoj instrument*, Vishha shkola, Izd-vo pri L'vov. un-te, L'vov, 205 p.
4. Bugaj, Ju.N., Milevskij, Je.B., Karpik, R.T., Zagajduk, I.O. and others (1980), *MKI B 22 D 19/02. Sposob poluchenija armirovannyh otlivok* [Method for the production of reinforced castings], SSSR, A. s. № 1001573, 8 p.
5. Shuljar, I.O., Borushhak, L.O. and Borushhak, S.L. (2012), *MPK B 22 D 13/02. Mashyna dlja vidcentrovogo lytva ta armuвання vylyvkiv* [Machine for centrifugal casting and reinforcement of castings], Ukrai'na, Pat. 72194, Bjul. № 15.
6. Shuljar, I.O., Borushhak, L.O. and Panchuk, V.G. (2012), «Tehnologija ta ustatkuvannja dlja otrymannja armovanyh vylyvkiv vidcentrovym lytvom iz zminnym polozhennjam osi obertannja formy», *Naukovyj Visnyk Donbas'koi' derzhavnoi' mashynobudivnoi' akademii'*, No. 2 (10 E), Kramators'k, pp. 154–163.
7. Shuljar, I., Makovijchuk, M. and Rop'jak, L. (2013), «Doslidzhennja ruhu tverdyh chastynok u ridkomu splavi pry vidcentrovomu armuванні z dvoma vzajemno perpendykuljarnymy osjamy obertannja lyvarnoi' formy», *Naukovi notatky*, No. 40, Luc'k, pp. 321–330.
8. Rop'jak, L.Ja., Shuljar, I.O. and Bogachenko, O.M. (2016), «Vplyv tehnologichnyh parametrov procesu vidcentrovogo armuвання na pokaznyky jakosti detalej», *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, Vol. 1, No. 5 (79), pp. 53–62.
9. Zhizhkina, N.A. (2016), *Centrobezhnoe lit'e listoprokatnyh valkov*, monografija, BGTU, Brjansk, 180 p.
10. Serebrjakov, S.P., Frolov, Ja.V. and Fokin, B.V. (2007), «Osobennosti centrobezhnogo lit'ja s vertikal'noj os'ju vrashhenija», *Litejnoe proizvodstvo*, No. 1, pp. 18–20.
11. Budag'janc, N.A., Zhizhkina, N.A. and Kondratenko, V.I. (2000), «Poisk metodov opredelenija stepeni naprjazhennogo sostojanija bimetallicheskih valkov dlja nepreryvnyh tonkolistovyh prokatnyh stanov», *Resursozberigajuchi tehnologii virobництва ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni*, zbirnik naukovih prac', SNU, Lugans'k, pp. 98–103.

**Пригоровська Тетяна Олексіївна** – асистент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

– математичне моделювання;

– комп'ютерне моделювання отримання заготовок, взаємодії об'єктів і технологічних процесів.

E-mail: [t\\_pryhorovska@nung.edu.ua](mailto:t_pryhorovska@nung.edu.ua).

**Роп'як Любомир Ярославович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри комп'ютерного машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
  - розроблення технологічних процесів зміцнення деталей покриттями та складання виробів.
- E-mail: l\_gorjak@ukr.net.

**Когут Ігор Степанович** – інженер

Наукові інтереси:

- розроблення комп'ютерних програм, комп'ютерне моделювання;
- програмування верстатів з ЧПК.

**Панчук Віталій Георгійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерного машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

- математичне і комп'ютерне моделювання;
- робототехнічні системи;
- дослідження процесів різання металів.

**Борушак Любомир Онуфрійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерного машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

- відцентрове литво та армування виливок;
- розроблення технологічних процесів відцентрового армування.

**Шуляр Ірина Орестівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерного машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

- дослідження формоутворення деталей;
- комп'ютерне моделювання.

Стаття надійшла до редакції 26.10.17.