

УДК 621.981.1

Грибков Е. П.
Добронос Ю. К.
Свешников І. А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РАДІУСУ ЗГИНУ ЗАГОТОВКИ НА ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЕЗГИНУ

Одними з основних напрямків розвитку металургійної й машинобудівної галузей України є розширення сортаменту, поліпшення якості й зниження собівартості металопродукції, серед якої особливе місце займають гнуті профілі. Виробництво й застосування гнутих профілів – один з найважливіших шляхів зниження енерговитрат і металоємності виробів, підвищення якості машин і споруд. При цьому має місце ряд припущень при теоретичному моделюванні процесів профілезгину.

Значний внесок у розвиток теорії та практики виробництва профільованого листа внесли В. І. Давидов, М. П. Максаков, Г. Я. Гун, П. І. Полухін, Г. О. Смирнов-Аляєв, К. Н. Богоявленський, А. К. Григор'єв, І. С. Тришевський, В. В. Дрогобецький, а також ряд інших вчених і фахівців. Так, наприклад, у своїй теорії В. І. Давидов і М. П. Максаков [1] приймають, що поперечні перерізи заготовки перебувають незмінно в площинах, перпендикулярних напрямку руху, а крайки залишаються прямолінійними. Г. Я. Гун, П. І. Полухін і Г. О. Смирнов-Аляєв [2, 3] у своїй математичній моделі процесу профілювання ґрунтуються на моделі ділянки плавного переходу, для якого поперечні перерізи заготовки залишаються плоскими й перпендикулярними осі профілювання, довжина нейтральної лінії деформації в кожному перерізі, перпендикулярному осі профілювання, постійна й дорівнює початковій ширині заготовки. К. М. Богоявленський і А. К. Григор'єв [4] вважають, що, фактично, пружна деформація крайки має місце не тільки на довжині видимої формуємої ділянки, а поширюється й за осьову площину валків на довжину деформації.

Аналітичні рішення задач профілювання виконані І. С. Тришевським і його співробітниками [5, 6] на підставі дослідницьких робіт, проведених на базі Українського науково-дослідного інституту металів (УКРНДІМЕТ). Зокрема, саме І. С. Тришевський [5, 6] запропонував у переходах, коли відносний радіус кривизни місця вигину $\rho < 5$, розглядати напружено-деформований стан як плоский, а коли $\rho > 5$ – як об'ємний, тому що прийняття загальних спрощень для всього діапазону пластичного вигину приводить до значних неточностей для тих або інших його стадій.

Розглянуті математичні моделі є інженерними, розробленими зі значною кількістю допущень і спрощень і за точністю і адекватністю результатів вже не відповідають сучасним вимогам. Більш високий рівень результатів притаманний чисельним математичним моделям, серед яких найбільш інформативним є метод скінчених елементів.

Стосовно процесу гнуття профілів метод скінчених елементів було використано в роботах [7–12]. В них проведено моделювання для окремих видів гнутих профілів насамперед з погляду розробки технологічних переходів профілювання, тобто досліджувалася кінематика пластичної течії металу. В той же час енергосилові параметри процесу, на відміну від вказаних вище аналітичних рішень, в них практично не розглянуті, хоча можливості, що надає метод скінчених елементів, дозволяють проводити такий аналіз.

Метою даного дослідження є оцінка впливу радіусу згину заготовки на енергосилові параметри процесу профілезгину.

Відповідно до викладеного було виконано скінчено-елементне моделювання відповідних технологій. Модель профілювання гнутого профілю була реалізована в пакеті кінцево-елементного моделювання Abaqus, що є універсальною програмою загального призначення [13–15]. При цьому вона забезпечує високий рівень візуалізації процесу і результатів моделювання.

Розрахункова схема включає профілезгинальні ролики й заготовку відповідних параметрів, які створюються у вигляді об'ємних зображень безпосередньо при моделюванні і надалі розбиваються на безліч скінчених елементів. Слід зазначити, що при виборі типу елементів, що використовували при реалізації МСЕ, необхідно враховувати геометричні особливості виробу, який моделюють. Бібліотека елементів Abaqus містить елементи оболонки, які дозволяють моделювати нелінійне поведіння з великими переміщеннями. Таким чином, для підвищення швидкості розрахунків, а саме зменшення кількості скінчених елементів, при моделюванні гнуття металу були використані універсальні чотирьохвузлові білінійні елементи типу CPS4R з плоскою деформацією й контролем руйнування. Чотирьохвузловий елемент найкраще моделює нелінійну деформацію й дозволяє з найбільшою точністю робити обчислення, тому рекомендується для використання при моделюванні тривимірних завдань ОМД [13]. В програмному пакеті Abaqus ролики задавали як абсолютно тверді тіла (рис. 1) з заданою частотою обертання, а заготовка – елементом, що деформується, попередньо розбитим на кілька областей (сіткою), що має певні механічні властивості, і так само задається швидкістю і напрямком руху.

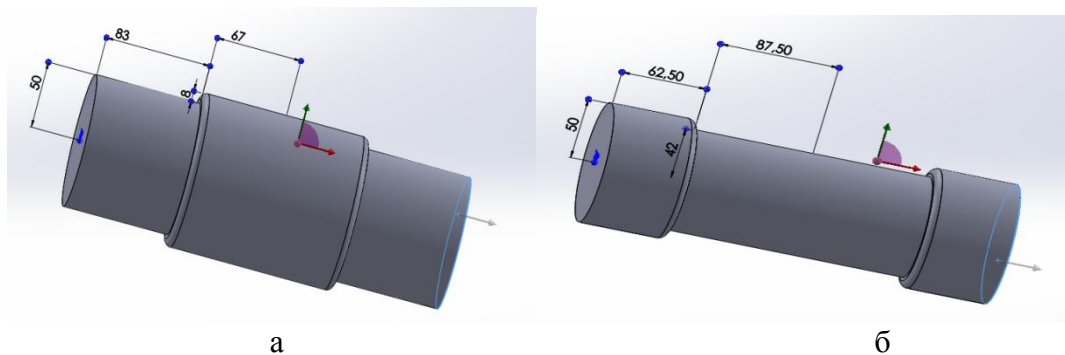


Рис. 1. Моделі нижнього (а) та верхнього (б) роликів профілезгинальної кліти при гнутті жолобчастого профілю

У якості об'єкту моделювання було обрано жолобчастий профіль, представлений на рис. 2. При розрахунках була прийнята ізотропна пружнопластична модель матеріалу листа – сталь 35, обрана з урахуванням зміцнення [16] (рис. 3). Контакт між заготовкою й валками задавався за допомогою моделі контакту «Поверхня до поверхні» шляхом задавання коефіцієнту тертя $\mu = 0,1$ з використанням «Classical isotropic Coulomb friction model». Як граничні умови було визначено 1 ступінь свободи для роликів а саме обертання щодо осі ОУ зі швидкістю 2 рад/с. Так само було задано переміщення заготовки зі швидкістю 1 мм/с. Мікроликовий зазор і товщина листа дорівнюють 1 міліметру. Загальний вигляд моделі процесу представлений на рис. 4.

Для визначення впливу геометричних параметрів гнуття, а саме, радіусу жолобників калібру на енергосилові параметри процесу було виконано три реалізації моделі з радіусами жолобників роликів відповідно 1 мм, 2 мм і 5 мм. Результати розрахунків показників напружено-деформованого стану для всіх трьох випадків представлені на рис. 5...7 у вигляді полів еквівалентних напружень та еквівалентних деформацій.

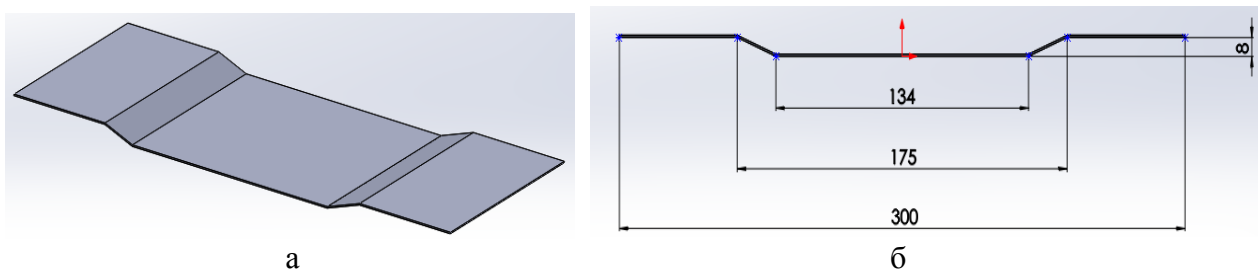
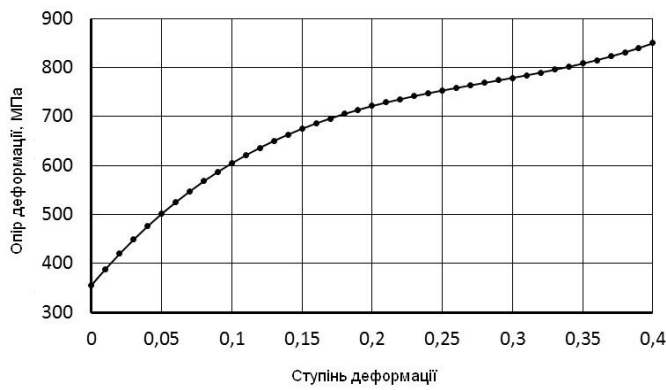


Рис. 2. Жолобчастий профіль (а) та переріз (б) листа, що вигинається



Data		
	Yield Stress	Plastic Strain
1	244	0
2	256	0.01
3	268	0.02
4	279	0.03
5	291	0.04
6	302	0.05
7	312	0.06
8	323	0.07
9	333	0.08

а

б

Рис. 3. Крива зміцнення сталі 35 (а) та значення відповідних напружень і деформацій в моделі (б)

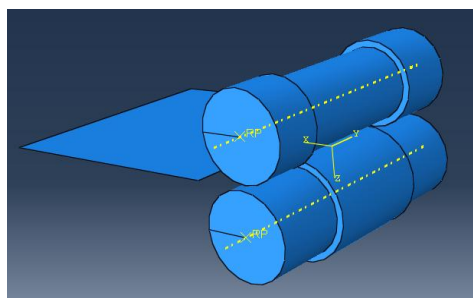
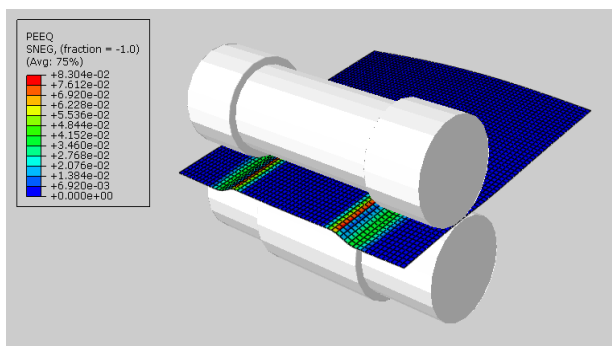
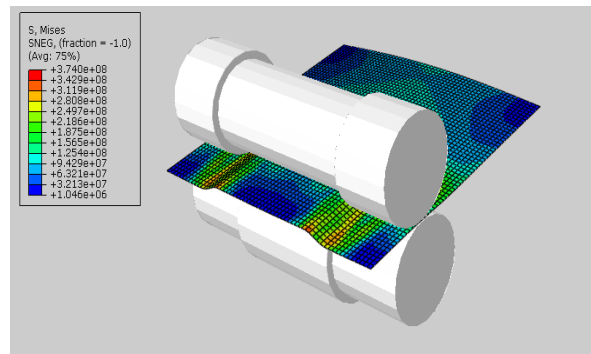


Рис. 4. Загальний вигляд моделі процесу профілювання жолобчастого профілю в програмному середовищі Abaqus

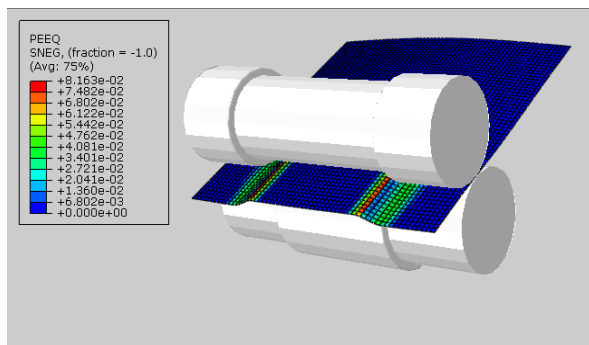


а

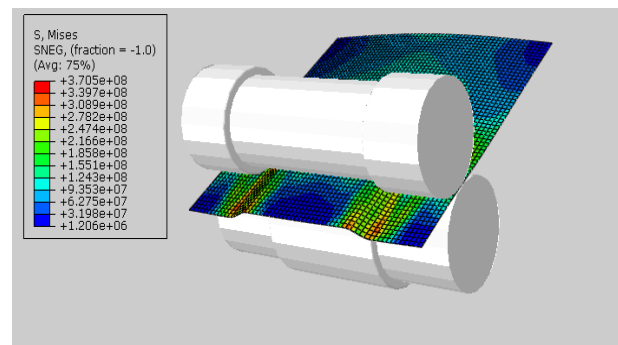


б

Рис. 5. Поле еквівалентних деформацій (а) та поле еквівалентних напружень (б) при гнутті у валках з радіусом жолобників 1 мм



а



б

Рис. 6. Поле еквівалентних деформацій (а) та поле еквівалентних напружень (б) при гнутті у валках з радіусом жолобників 2 мм

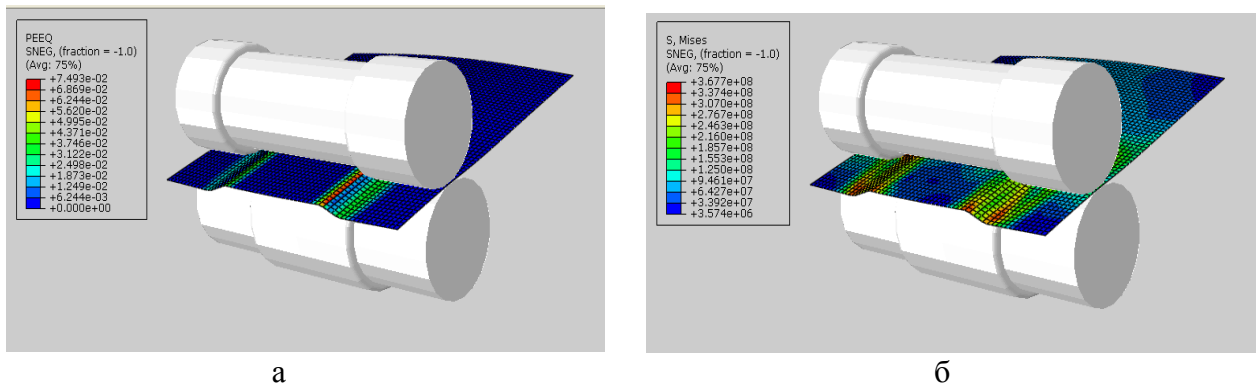


Рис. 7. Поле еквівалентних деформацій (а) та поле еквівалентних напружень (б) при гнутті у валках з радіусом жолобників 5 мм

На основі одержаних значень локальних характеристик напружено-деформованого стану були розраховані й інтегральні показники сили та моменту профілювання, розгорнуті у часі перебігу процесу (рис. 8–9).

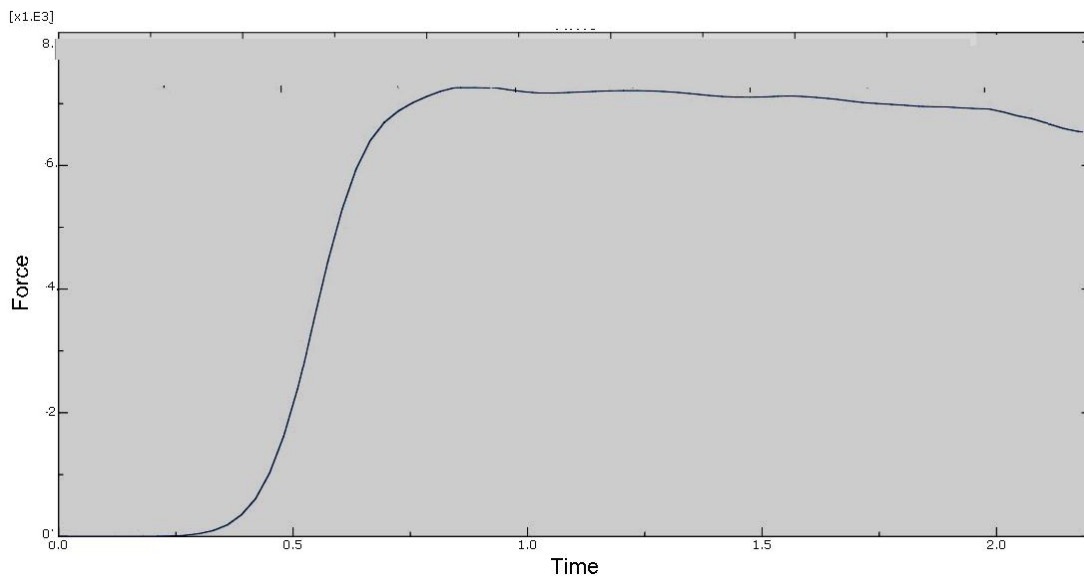


Рис. 8. Графік залежності сили профілювання за часом при радіусі жолобників 2 мм

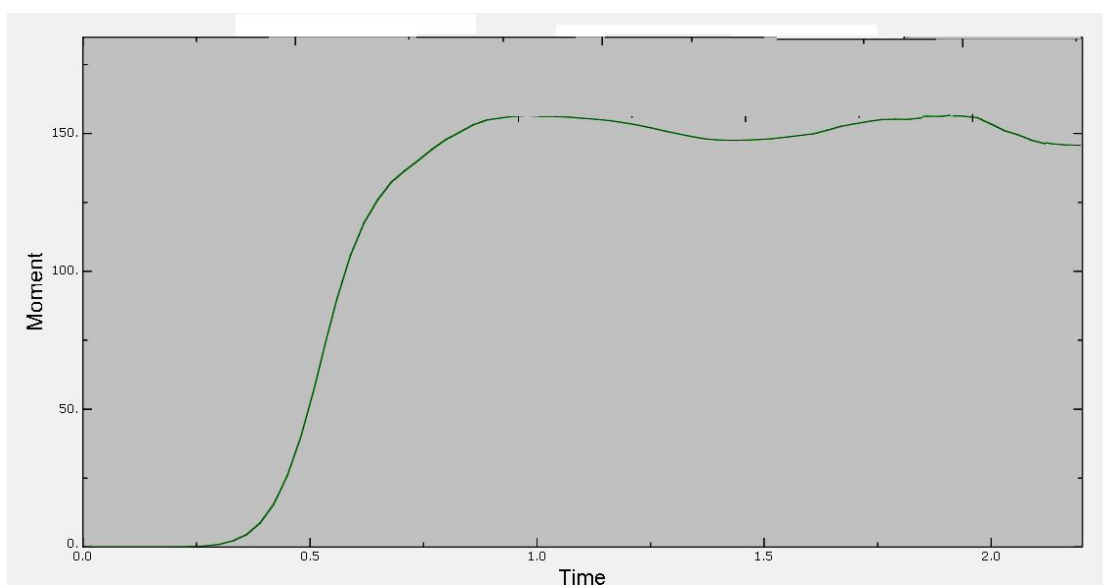


Рис. 9. Графік залежності моменту профілювання за часом при радіусі жолобників 2 мм

Аналіз одержаних результатів однозначно вказує на зниження сили і моменту профілювання зі зниженням радіусу жолобників, що корелюється з результатами кінцево-різницевого моделювання [17]. Графічні залежності між вказаними параметрами, одержані скінчено-елементним моделюванням, представлені на рис. 10–11 і за характером близькі до лінійних.

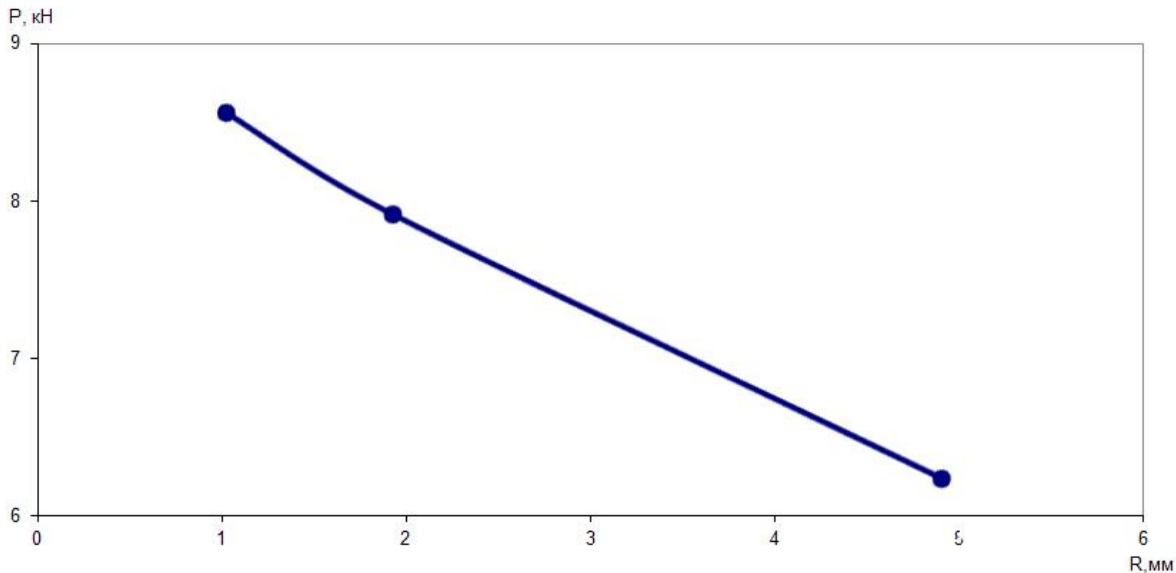


Рис. 10. Графічна залежність сили профілювання від радіусу жолобника за результатами скінчено-елементного моделювання

В той же час кількісно одержані результати дещо нижчі за результати кінцево-різницевої моделі, що свідчить про необхідність проведення експериментальних досліджень для оцінки їхньої вірогідності в обох випадках.

Слід вказати, що підходи, використані при скінчено-елементному моделюванні профілювання жолобчастого профілю, є універсальними і можуть бути використані при моделюванні профілювання інших, по меншій мірі, відкритих або напіввідкритих виробів, які разом з валками відповідного профілю графічно моделюються для кожного випадку, що розглядається.

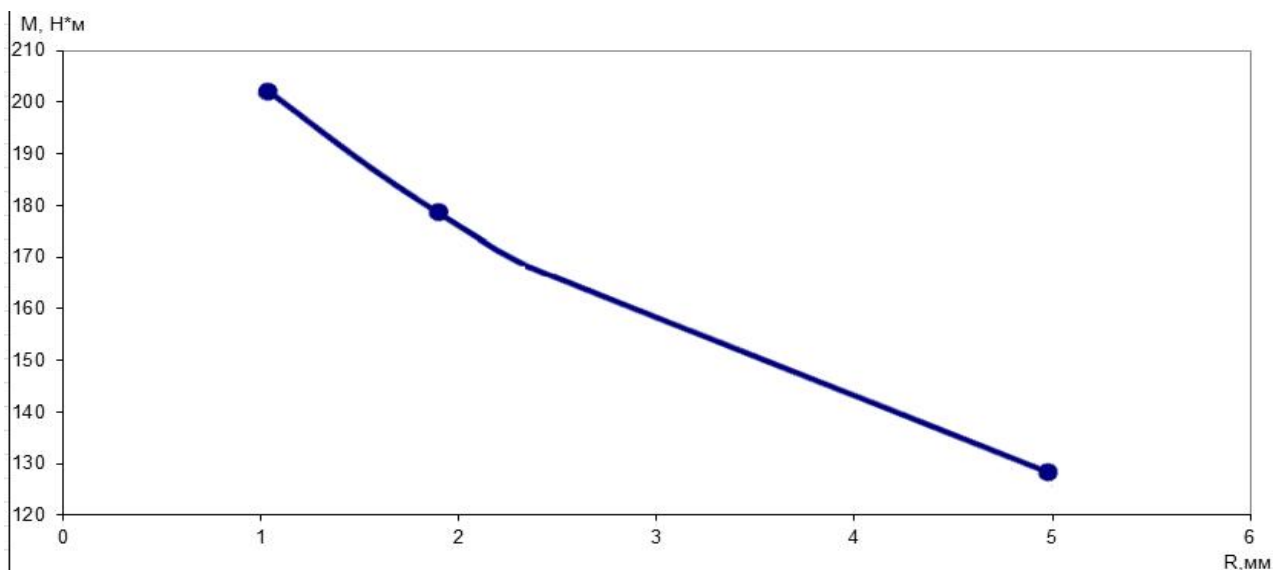


Рис. 11. Графічна залежність моменту профілювання від радіусу жолобника за результатами скінчено-елементного моделювання

Таким чином, розроблений підхід скінчено-елементного моделювання профілювання гнутих профілів в програмному продукті ABAQUS є досить універсальним, враховує більшу, і з більшою точністю у порівнянні з іншими моделями, кількість чинників і може бути рекомендований для розробки технологій виробництва гнутих профілів на профілезгинальних агрегатах.

ВИСНОВКИ

На основі розробленої скінчено-елементної моделі процесу гнуття у роликах встановлено, що збільшення радіусу перегину профілю однозначно призводить до зменшення сили і моменту профілювання. Причому інтенсивність вказаного зменшення найбільша при зменшенні радіусу від 1 мм до 2 мм, а надалі з ростом радіусу спадає.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Давыдов В. И. Производство гнутых профилей / В. И. Давыдов, М. П. Максаков. – М. : Металлург, 1959. – 233 с.
2. Гун Г. Я. Пластическая деформация металлов и сплавов / Г. Я. Гун, П. И. Полухин // Труды МИСИ. – М. : Металлургия, 1974. – № 76. – С. 19–23.
3. Смирнов-Аляев Г. А., Гун Г. Я. // Известия вузов. Черная металлургия. – Москва : МИСИ, 1962. – № 11. – С. 111–117.
4. Богоявленский К. Н., Григорьев А. К. // Обработка металлов давлением. Труды ЛПИ. – М.–Л. : Машиностроение, 1965. – № 243. – С. 118–125.
5. Тришевский И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М. : Металлургия, 1980. – 288 с.
6. Тришевский О. И. Методика расчета технологических параметров формовки в валках замкнутых гофров на листовых и гнутых профилях / О. И. Тришевский // КШП. ОМД. – 2012. – № 1. – С. 25–27.
7. Методика расчета технологических параметров при профилировании / В. П. Шеногин, Н. В. Тепин, В. А. Храбров, А. С. Постнов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 4. – С. 35–37.
8. Илюшкин М. В. Моделирование контактных взаимодействий роликового инструмента с полкой профиля швеллерного типа при изготовлении гнутых профилей методом интенсивного деформирования / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов, В. В. Марковцева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 1(2). – С. 397–400.
9. Mathematical Simulation of the Forming of a Round Welded Steel Tube into a Square Profile in Four-Roll Passes / К. Е. Akopyan, А. V. Kolobov, D. A. Rodichev, M. S. Seleznev, V. S. Trusov, E. S. Fedotov, V. S. Yusupov // Russian Metallurgy (Metally). – 2012. – No. 5. – P. 375–379.
10. Paralikas J. Robust optimization of the energy efficiency of the cold roll forming process / John Paralikas, Konstantinos Salonitis, George Chryssolouris // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 69. – Issue 1. – P. 461–481. DOI: 10.1007/s00170-013-5011-0.
11. Park H. S. Optimization of roll forming process with evolutionary algorithm for green product / Hong Seok Park, Trung Thanh Nguyen // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2013. – Vol. 14. – Issue 12. – P. 2127–2135. – DOI: 10.1007/s12541-013-0288-3.
12. Zeng Guo. Sensitivity analysis of parameters for multi-stand roll forming using a new booting model / Guo Zeng, Xin-min Lai, Zhong-qi Yu, Zhong-qin Lin // Journal of Shanghai Jiaotong University. – 2008. – Vol. 13. – Issue 6. – P. 707–711. – DOI: 10.1007/s12204-008-0707-2.
13. Манилык Т. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5 / Т. Манилык, К. Ильин. – М. : МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 с.
14. Barabash A. V. Straightening of Sheet with Correction of Waviness [Electronic resource] / A. V. Barabash, E. Yu. Gavril'chenko, E. P. Gribkov, O. E. Markov // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – No. 12. – P. 916–920. – Access mode: <http://dx.doi.org/10.3103/S096709121412002X>.
15. Грибков Э. П. Конечно-элементное моделирование плющения порошковой проволоки / Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 63–66.
16. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 244 с.
17. Грибков Э. П. Математическое моделирование профилирования полос / Э. П. Грибков, А. В. Завгородний, В. А. Горюхов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА. – 2015. – № 3 (36). – С. 38–45.

REFERENCES

1. Davydov V. I. *Proizvodstvo gnutyh profilej* / V. I. Davydov, M. P. Maksakov. – M. : Metallurg, 1959. – 233 s.
2. Gun G. Ja. *Plasticheseskaja deformacija metallov i splavov* / G. Ja. Gun, P. I. Poluhin // *Trudy MISIS*. – M. : Metallurgija, 1974. – № 76. – S. 19–23.
3. Smirnov-Aljaev G. A., Gun G. Ja. // *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija*. – Moskva : MISIS, 1962. – № 11. – S. 111–117.
4. Bogojavlenskij K. N., Grigor'ev A. K. // *Obrabotka metallov davleniem. Trudy LPI*. – M.–L. : Mashinostroenie, 1965. – № 243. – S. 118–125.
5. Trishevskij I. S. *Teoreticheskie osnovy processa profilirovaniya* / I. S. Trishevskij, M. E. Doktorov. – M. : Metallurgija, 1980. – 288 s.
6. Trishevskij O. I. *Metodika rascheta tehnologicheskikh parametrov formovki v valkah zamknutih gofrov na listovyh i gnutyh profiljah* / O. I. Trishevskij // *KShP. OMD*. – 2012. – № 1. – S. 25–27.
7. *Metodika rascheta tehnologicheskikh parametrov pri profilirovanii* / V. P. Shenogin, N. V. Tepin, V. A. Hrabrov, A. S. Postnov // *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. – 2007. – № 4. – S. 35–37.
8. Iljushkin M. V. *Modelirovanie kontaktnyh vzaimodejstvij rolkovogo instrumenta s polkoj profilja shvelernogo tipa pri izgotovlenii gnutyh profilej metodom intensivnogo deformirovaniya* / M. V. Iljushkin, V. I. Filimonov, V. V. Markovceva // *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. – 2014. – T. 16. – № 1(2). – S. 397–400.
9. *Mathematical Simulation of the Forming of a Round Welded Steel Tube into a Square Profile in Four-Roll Passes* / K. E. Akopyan, A. V. Kolobov, D. A. Rodichev, M. S. Seleznev, V. S. Trusov, E. S. Fedotov, V. S. Yusupov // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2012. – No. 5. – P. 375–379.
10. Paralikas J. *Robust optimization of the energy efficiency of the cold roll forming process* / John Paralikas, Konstantinos Salonitis, George Chryssoulouris // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 69. – Issue 1. – P. 461–481. DOI: 10.1007/s00170-013-5011-0.
11. Park H. S. *Optimization of roll forming process with evolutionary algorithm for green product* / Hong Seok Park, Trung Thanh Nguyen // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2013. – Vol. 14. – Issue 12. – P. 2127–2135. – DOI: 10.1007/s12541-013-0288-3.
12. Zeng Guo. *Sensitivity analysis of parameters for multi-stand roll forming using a new booting model* / Guo Zeng, Xin-min Lai, Zhong-qi Yu, Zhong-qin Lin // *Journal of Shanghai Jiaotong University*. – 2008. – Vol. 13. – Issue 6. – P. 707–711. – DOI: 10.1007/s12204-008-0707-2.
13. Manilyk T. *Prakticheskoe primenenie programmnoho kompleksa ABAQUS v inzhenernyh zadachah. Versija 6.5* / T. Manilyk, K. Il'in. – M. : MFTI, TESIS, 2006. – 99 s.
14. Barabash A. V. *Straightening of Sheet with Correction of Waviness [Electronic resource]* / A. V. Barabash, E. Yu. Gavril'chenko, E. P. Gribkov, O. E. Markov // *Steel in Translation*. – 2014. – Vol. 44. – No. 12. – P. 916–920. – Access mode: <http://dx.doi.org/10.3103-/S096709121412002X>.
15. Gribkov Je. P. *Konechno-jelementnoe modelirovanie pljushhenija poroshkovej provoloki* / Je. P. Gribkov // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2016. – № 1 (42). – С. 63–66.
16. Fedorinov V. A. *Matematicheskoe modelirovanie naprjazhenij, deformacij i osnovnyh pokazatelej kachestva pri prokatke otositel'no shirokih listov i polos : monografija* / V. A. Fedorinov, A. V. Satonin, Je. P. Gribkov. – Kramatorsk : DGMA, 2010. – 244 s.
17. Gribkov Je. P. *Matematicheskoe modelirovanie profilirovaniya polos* / Je. P. Gribkov, A. V. Zavgorodnij, V. A. Gorohov // *Visnik Donbas'koj derzhavnoj mashinobudivnoj akademii : zb. nauk. prac'*. – Kramators'k : DDMA. – 2015. – № 3 (36). – С. 38–45.

Грибков Е. П. – д-р техн. наук, доц. каф. АММ ДДМА;

Добронос Ю. К. – канд. техн. наук, доц. каф. АММ ДДМА;

Свешников І. А. – студент гр. МО-13-1 ДДМА.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Стаття надійшла до редакції 02.03.2018 р.