

Моделювання прокатування шариків в гвинтоподібних валках

Маковей В.О. • Проценко П.Ю. • Сохан Д.В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 01 December 2017 / Accepted: 19 June 2018

***Анотація.** Проведено моделювання декількох варіантів прокатування шариків з модельного матеріалу алюмінієвого сплаву AL-1100 та підшипникової сталі ШХ-15 з використанням програмного пакета Deform 3D. В якості профілюючих елементів для отримання шариків використовували гвинтоподібні валки. Досліджено вплив різних параметрів на напружено-деформований стан елементів валків та заготовки. Показано, що процес якісно відбувається без змащення при високому коефіцієнту тертя до 0,4. При цьому контактні напруження на поверхні валків досягають значних величин, що веде до необхідності додаткової обробки їх поверхонь методами поверхневого зміцнення. Запропоновано технологію та конструкцію валків для отримання шариків з циліндричних заготовок.*

***Ключові слова:** прокатування шариків, напружено-деформований стан, гвинтові валки, калібрування валків.*

Вступ. На сьогоднішній день шарики підшипників кочення виготовляють за допомогою наступних розповсюджених технологій: гарячого штампування, холодного висаджування та поперечно-гвинтової прокатки. Використання процесів гарячого штампування та холодного висаджування дозволяє скоротити витрати, але при масовому виробництві вони залишаються достатньо великими, що пов'язано з невисокою продуктивністю обладнання, а в ряду випадків неможливістю отримання виробів складної форми в холодному стані, особливо якщо вони мають канавки та велику довжину, наприклад ребристі труби. Найбільш широке розповсюдження знайшла поперечно-гвинтова прокатка в гвинтових валках, як продуктивна технологія виробництва таких виробів, річні потреби в яких часто складають сотні тисяч та мільйони штук.

Наряду з освоєнням та широким використанням прокатки шарів для млинів та шариків для підшипників існує їх дефіцит, особливо шариків малого діаметру 5-16 мм [1-6]. В теперішній час такі шарики підшипників виготовляються з використанням технології холодного висаджування, яке вимагає вирублення облою, що складає до 10...15% додаткових витрат металу [2,6]. Виникає необхідність розробки технологій прокатування та проектування станів для масового виробництва шарів малого діаметру в холодному стані. Важливим напрямком обробки металів тиском є також безоблойне штампування, яке потребує точних заготовок з різних металів, які можуть бути отримані прокаткою в гвинтових калібрах без витрат металу [7].

Технологія прокатки в гвинтових калібрах, яка виникла як високоефективний процес отримання шарів, що дозволяє в 2-3 рази підвищити продуктивність пластичного формоутворення, що є основою для зниження витрат при масовому виробництві деталей [8].

Головним питанням при створенні нових технологічних процесів поперечно-гвинтової прокатки є розробка та калібрування валків, що забезпечує отримання необхідної форми виробів без дефектів на зовнішній поверхні та розриву металу в їх осевій зоні. Важливим також є виділення виробів у валках без пошкодження поверхонь їх торців та без великих завуснів, а також забезпечення стійкості валків. Для забезпечення надійного захвату і обертання заготовки на поверхні гвинтових валків наносять рифлення. Розділення прутка на мірні заготовки в сучасних станах для прокатки шариків здійснюють шляхом підрізання по діаметру на пів оберту одного з валків, інший – може перекивати вісь прутка на 1-2 мм [9]. Також існують такі види калібрування валків, де розділення шару проводиться за рахунок збільшення ширини ребер в робочій частині валка, що викликає відділення шарів за рахунок розриву перемички [10]. Для збільшення терміну служби стану для прокатки шарів і забезпечення більш стійкого процесу прокатки в сучасних станах використовують асиметричні шаропркатні валки з підрізкою реборди одного з них на 20% від діаметра прутка [9].

Гвинтове калібрування має також свої особливості для кожного виду виробу.

Мета роботи: моделювання процесу прокатування шариків, розробка розрахунку та калібрування валків для прокатування шарів в холодному стані.

Осередок деформації при прокатуванні шарів має дві основні ділянки [4]. Вони складаються із формуючої, де заготовка обтискається зі змінною за формою та розмірів гвинтовою ребордою, та калібруючої, де форма та розміри форми реборді залишаються незмінними, а обтиски реалізуються завдяки овалізації заготовки. Формовка шарика відбувається ребордами валків, висота яких поступово збільшується. Для спрощення розрахунку калібрування та виготовлення валків прийнято, що висота реборди калібру змінюється за лінійним законом. Для нормального процесу прокатки профіль та розміри формуючої ділянки калібру розраховують таким чином, щоб в процесі обтиску заготовки виконувались наступні основні положення [5]:

- об'єм металу, який обтискається в калібру, повинен залишатися постійним на протязі всього процесу формування;

- зміни профілю та розмірів реборди калібру повинно відповідати витягуванню заготовки, яка обтискається;

- обтиск повинен виконуватися відносно вузькими ділянками, щоб запобігти розрихлення металу вздовж вісі заготовки.

Виконання вказаних умов забезпечує прокатування шарів правильної форми при мінімальних витратах енергії на деформацію та витрат металу.

Розрахунок калібрування зведено до призначення розмірів перерізу гвинтової реборди на всьому її протязі, а також кроків повздовжніх та поперечних подач.

При прокатуванні шариків розміри перерізу реборди визначаються радіусом R шарика, шириною вершини b та висотою реборди h [1]. Висота реборди відповідає радіусу перемички r та дорівнює:

$$h = R - r \quad (1)$$

При прокатуванні шариків приймають лінійний закон зміни висоти реборди, чим досягається постійна інтенсивність обтиску заготовки. Довжина формуючої ділянки при прокатуванні шариків приймається такою, щоб забезпечити виготовлення шариків при обертанні валка на 1,25 оберту. При більш коротшій формуючій ділянці гвинтова реборда не буде підпирати заготовку з боку входу прутка в валки, що може привести до не точності форми шарика. Використання більш довшої формуючої ділянки затрудняє виготовлення шариків.

Аналіз калібрування валків для прокатування шариків, які використовуються в промисловості [1], дозволило знайти емпіричну залежність мінімальної ширини вершини реборди калібру від радіусу шарика:

$$b_{min} = 0,04R + 1,3 \quad (2)$$

Для надійного прилягання металу до реборди валка, необхідно забезпечити, щоб перемичка, яка обтискається, отримувала натяг, це виключить появу плівок та закатів на поверхні шарика. При цьому кінцевий радіус (r_k) обтискаємої перемички перед відрізкою та кінцева ширина реборди (b_k) по емпіричним формулам

$$r_k = 0,19R + 0,34 \quad (3)$$

$$b_k = 0,14R + 2,6 \quad (4)$$

Валок з гвинтовим калібром для прокатування заготовок шариків діаметром 32 мм представлено на рис. 1. Він спроектований з урахуванням вище наведених визначень розмірів реборди, а також кроків повздовжніх та поперечних подач.

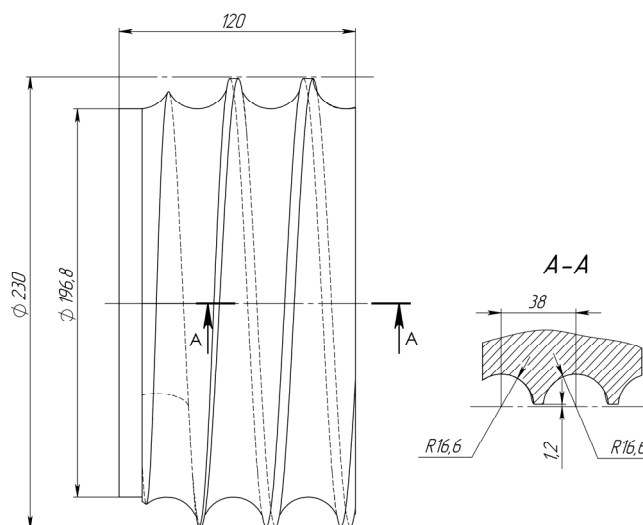


Рис. 1. Спеціально спрофільований гвинтоподібний валок для прокатки шариків діаметром 32 мм

Розглянуто два варіанту моделювання - спочатку з використанням модельного матеріалу алюмінієвого сплаву AL-1100 та в другому варіанті з використанням підшипникової сталі ШХ-15 після відпуску. Моделювання виконувалося в програмі Deform 3D

Проведено моделювання процесу прокатки шариків діаметром 32 мм з алюмінієвого сплаву AL-1100. Модель процесу прокатки шариків діаметром 32 мм, що створена в програмі Deform 3D, показана на рис. 2. Заготовка 1 у вигляді прутка була розбита на сітку тетраедричних скінчених елементів, кількість яких складає 75376. Коефіцієнт контактної тертя між поверхнями валків та прутка задавався – 0,4.

Для запобігання викривлення прутка в процесі прокатки в моделі використовувались обмежувачі 4 та 5, а також направляюча втулка 6.

Заготовка 1 задавалась як пластичне тіло, властивості якої відповідають алюмінієвому сплаву AL-1100, що вводилися в програму у вигляді кривої зміцнення (рис. 3).

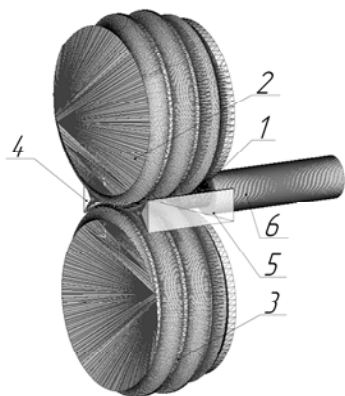


Рис. 2. Модель процесу прокатки шариків підшипників ковзання діаметром 32 мм

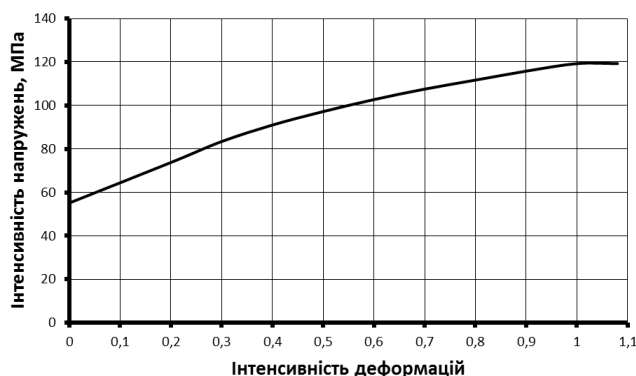


Рис. 3. Крива зміцнення алюмінієвого сплаву AL-1100

Процес моделювання проходив в 2 етапи:

1. Спочатку в заготовку 1 одночасно втискувалися валки 2, 3 в пруток 1 на глибину $h = 0,1$ мм.
2. Далі відбувався процес прокатки шариків при обертанні частин валків 2 та 3 відносно своїх осей із частотою обертів $n=100$ хв⁻¹.

На рис. 4 наведений поетапний процес прокатування шариків, який включає отримання першого виробу у вигляді шарика неповного формування контуру (рис.4, а) та подальшого прокатування шариків правильної форми (рис. 4, б).

По результатам моделювання було встановлено розподіл інтенсивності напружень σ_i та деформацій ε_i заготовки 1 в процесі прокатки. На рис. 5 показано розподіл інтенсивності напружень в поздовжньому розрізі заготовки, а на рис. 6 - розподіл інтенсивності деформацій в поздовжньому розрізі заготовки. З розподілів видно, що величина інтенсивностей напружень та деформацій біля перемички в 1,3 разів вища ніж в гвинтових ручаях валків. В результаті чого реборди валків інтенсивно піддаються втомному зношуванню в процесі прокатки.

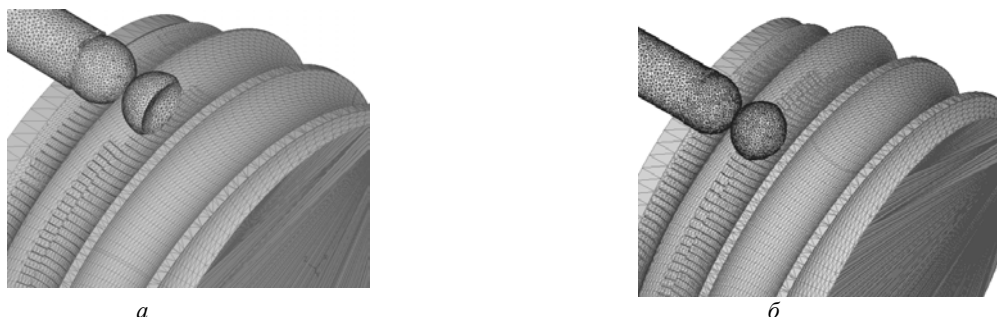


Рис. 4. Прокатування шариків в гвинтоподібних валках

В подальшому проведено моделювання процесу прокатки шариків підшипників кочення зі сталі ШХ-15 діаметром 8 мм після відпуску для аналізу напружень, що будуть діяти в тілі валків, на їх робочій поверхні.

Модель процесу прокатки шариків підшипників кочення зі сталі шх-15, що створена в програмі Deform 3D, показана на рис.7. Заготовка 1 у вигляді прутка була розбита на сітку тетраедричних скінчених елементів, кількість яких складає 48388. Коефіцієнт тертя задавався – 0,3.

Оскільки оперативна пам'ять комп'ютера була обмежена 8 Гбайтами в моделі використовувались лише частини валків 2, 3, що були також розбиті сітками тетраедричних елементів, кількість яких склала 62854. Частини валків 2, 3 (інструмент) задавались як абсолютно пружні тіла, властивості яких відповідали властивостям сталі X12M (в програмі задані властивості іноземного аналога цієї сталі – AISI D2): модуль Юнга $E=206754$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu=0,3$. На поверхнях частин валків 2, 3 вирізані спіральні канавки з тонкими стінками. В цих зонах сітка тетраедричних елементів була подрібнена (рис. 8), в результаті чого розмір одного елемента склав 0,35 мм.

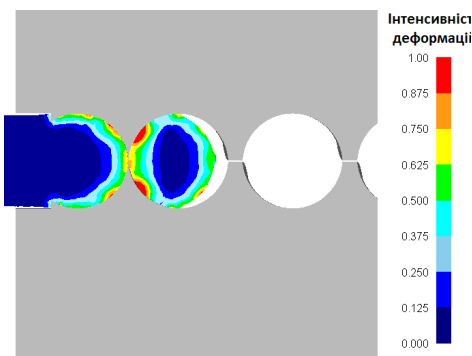


Рис. 5. Розподіл інтенсивності в деформації поздовжньому розрізі заготовки

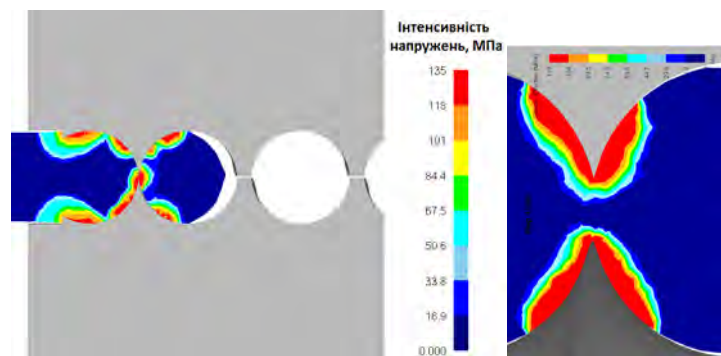


Рис. 6. Розподіл інтенсивності напружень в поздовжньому розрізі заготовки (а) та осередок деформації в заготовці (б)

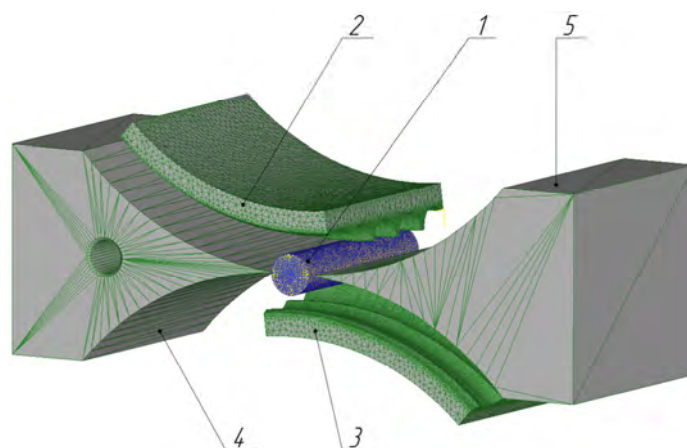


Рис. 7. Модель процесу прокатки шариків підшипників кочення

Для запобігання викривлення прутка в процесі прокатки в моделі використовувались обмежувачі 4, 5.

Заготовка 1 задавалась як пластичне тіло, властивості якої відповідають сталі ШХ15, що вводились в програму у вигляді кривої зміцнення (рис. 9).

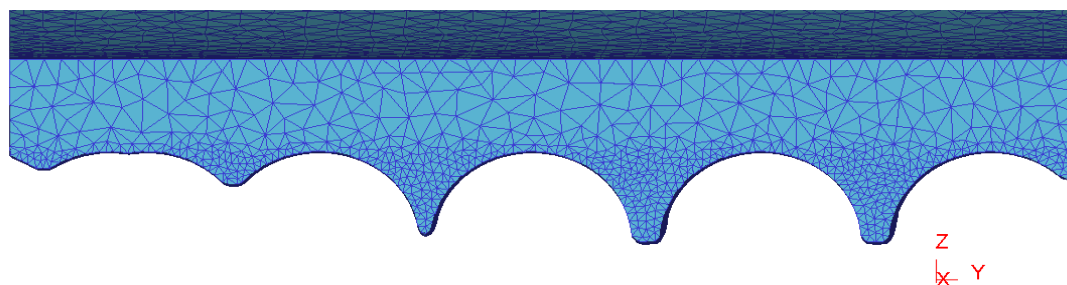


Рис. 8. Частина валка розбита на сітку тетраедричних елементів та їх подрібнення в зоні спіральної канавки

Процес моделювання проходив в 2 етапи:

1. Спочатку в заготовку 1 одночасно втискувалися частини валків 2, 3 на глибину $h = 4$ мм.

2. Далі відбувався процес прокатки шариків при обертанні частин валків 2 та 3 відносно своїх осей із частотою обертів $n=100$ 1/хв.

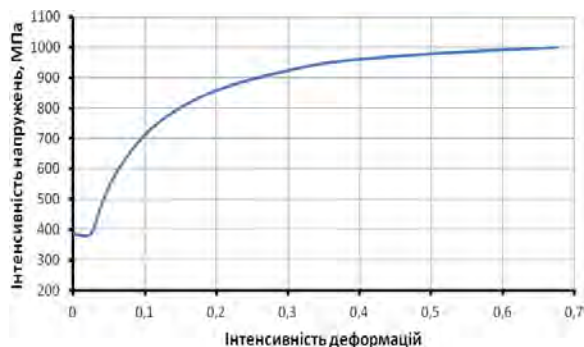


Рис. 9. Крива зміцнення сталі 3Х-15

По результатам моделювання було встановлено розподіл інтенсивності напружень σ_i та деформацій ε_i заготовки 1 в процесі прокатки. На рис. 10 показано розподіл інтенсивності напружень в поздовжньому розрізі заготовки. На рис. 11 показано розподіл інтенсивності деформацій в поздовжньому розрізі заготовки. Інтенсивність напружень досягає величини в процесі прокатки 1400 МПа в зоні перемички, а в зоні ручаїв досягає 1150 МПа. Аналіз розподілів інтенсивності напружень та деформацій показує подібність до тої картини, що спостерігалась при аналізі результатів моделювання процесу прокатки шариків діаметром 32 мм (див. рис. 5-6). Як і в попередньому випадку, величина інтенсивностей напружень та деформацій біля перемички в 1,3 разів вища ніж в гвинтових ручаях валків.

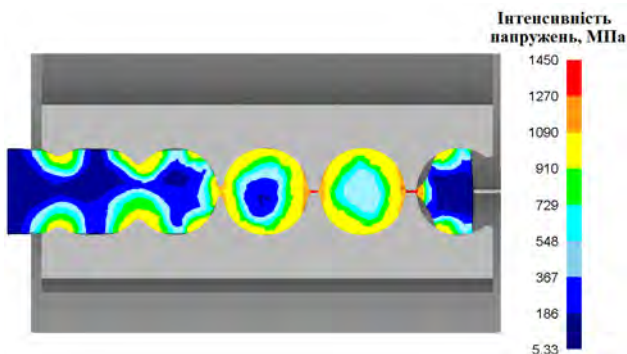


Рис. 10. Розподіл інтенсивності напружень в поздовжньому розрізі заготовки

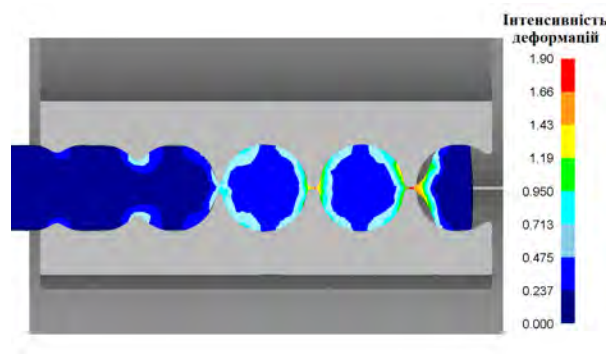


Рис. 11. Розподіл інтенсивності деформацій в поздовжньому розрізі заготовки

Отримано розподіли інтенсивності напружень, що виникають в зонах спіральних канавок частин валків 2 і 3, поздовжній розріз яких показаний на рис. 12. Найбільші величини напружень спостерігаються на вершинах гострих частин ребер валків, а також на дні гвинтових ручаїв валків. Допустиме напруження стиску для сталі Х12М складає 1600 МПа [11].

Шляхом нанесення зносостійких покриттів, наприклад, електроіскровим легуванням можна підвищити зносостійкість робочої поверхні валків та допустиму величину контактних напружень [12]. Для вибору оптимального покриття необхідні подальші дослідження.

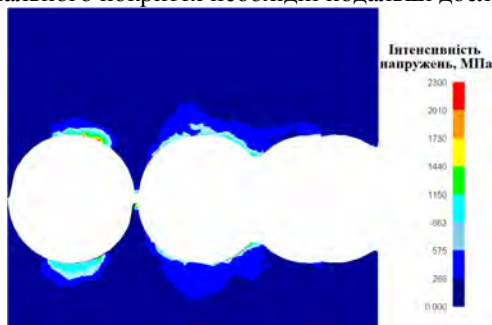


Рис. 12. Розподіли інтенсивності напружень в поздовжньому розрізі частин валків 2 і 3 в процесі прокатки шариків

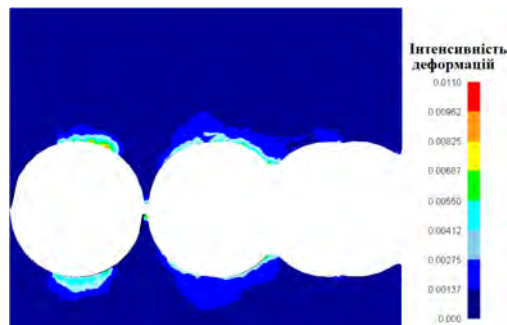


Рис. 13. Розподіли інтенсивності деформацій в поздовжньому розрізі частин валків 2 і 3 в процесі прокатки шариків

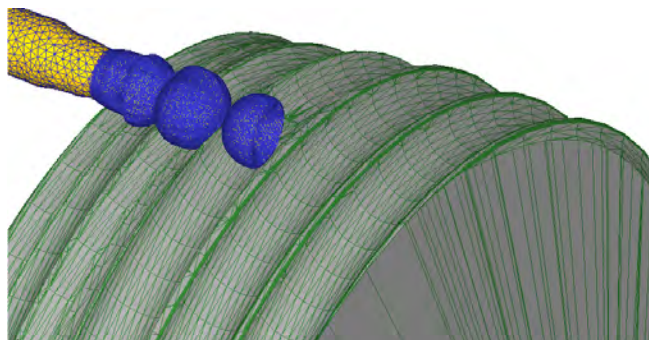


Рис. 14. Результати прокатування шариків (після 12722 кроків розрахунку)

Моделювання також показало (див. рис. 14), що першій шарик при прокатуванні має дефект (неповне заповнення форми). В подальшому виготовляються шарики правильної форми. Як показують проведенні дослідження процес поперечно-гвинтової прокатки в гвинтових валках для отримання шариків діаметром 8 мм в холодному стані можливий. Під впливом сил тертя заготовка провертається під час її переміщення по ручаям валків, що забезпечує необхідну форму шариків. Але виникають достатньо великі контактні напруження (див. рис. 12), що можуть досягати 2000 МПа, тому необхідно крім операції закалювання виконувати додаткову операцію поверхневого зміцнення робочих поверхонь валків для забезпечення їх довговічної роботи.

Висновки

1. Позитивні результати експлуатації дослідних станів для холодної прокатки дрібних шариків дозволяють передбачити, що в результаті подальших досліджень можливо створити технології, оснащення та високопродуктивні стани для холодного прокатування шариків для підшипників та точних заготовок у вигляді шарів для точного безоблойного штампування та видавлювання. Прокатані заготовки більш точні ніж штамповані. Точність діаметрів шариків після прокатування 0,2...0,3 мм, овальність 0,05...0,15 мм. Дослідні стани для холодної прокатки дрібних шариків показали високу продуктивність до 300... 400 шт/хв.

2. Порівняння моделювання з використанням модельного матеріалу алюмінієвого сплаву AL-1100 та підшипникової сталі ШХ-15 після відпуску показує подібність процесів прокатування незалежно від значного збільшення в разі сталі механічних властивостей (в 8 разів). Що дозволяє використовувати прокатування в гвинтоподібних валках виробів з різних матеріалів. В зоні перемички в заготовці величини інтенсивностей напружень та деформацій вищі в 1,3 рази порівняно з розподілом цих величин в тілі заготовки в зоні гвинтових ручаїв валків (див. рис. 5-6 та рис. 10-11) в обох випадках чисельних моделювань процесів поперечно-гвинтової прокатки шариків.

3. Моделювання прокатування шариків діаметром 8 мм зі сталі ШХ-15 після відпуску показало, що процес якісно відбувається без змачення при високому коефіцієнту тертя до 0,4. При цьому контактні напруження на поверхні валків можуть досягати 2000 МПа (див. рис. 12-13), що може призвести до швидкого їх зношування та руйнування їх поверхні. Тому для підвищення їх зносостійкості необхідно використовувати методи поверхневого зміцнення.

4. Повне оформлення профілю шарика діаметром 8 мм (див. рис.14) відбувається при обертанні валків на 720 – 900 градусів (два – три оберту валків). Після цього шарик відокремлюється від прутка і випадає. Процес прокатування протікає без зупинки, високе тертя забезпечує прокрутку прутка валками.

Моделирование прокатки шариков в винтообразных валках

В.А. Маковей, П.Ю. Проценко, Д.В. Сохан

Аннотация. Проведено моделирование нескольких вариантов прокатки шариков диаметром 8 мм и 32 мм из модельного материала алюминиевого сплава AL-1100 и подшипниковой стали ШХ-15 с использованием программного пакета Deform 3D. В качестве профилирующих элементов для получения шариков использовали винтовые валки. Исследовано влияние различных параметров на напряженно-деформированное состояние элементов валков и заготовки. Показано, что процесс качественно происходит без смазки при высоком коэффициенте трения до 0,4. При этом контактные напряжения на поверхности валков достигают значительных величин, что ведет к необходимости дополнительной обработки их поверхностей методами поверхностного упрочнения. Предложена технология и конструкция валков для получения шариков из цилиндрических заготовок.

Ключевые слова: прокатки шариков, напряженно-деформированное состояние, винтовые валки, калибровка валков.

Modeling ball rolling in spiral rolls

V. Makovei, P. Protsenko, D. Sokhan

Abstract. *The simulation of several variants of rolling of drawers from the model material of aluminum alloy AL-1100 and bearing steel 316L using the software package Deform 3D. Helical-shaped rollers were used as the profiling elements for receiving balls. The influence of various parameters on the stress-strain state of roll elements and workpieces is investigated. It is shown that the process qualitatively occurs without lubrication at high coefficient of friction up to 0.4. The contact stresses on the surface of the rolls reach significant values, which leads to the need for additional surface treatment by surface hardening methods. The technology and construction of rollers for cylindrical billets are offered.*

Keywords: *rolling balls, stress-deformed state, screw rolls, calibration of rolls.*

References

1. Грановский С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах. М.: Металлургия, 1980. - 116 с.
2. Целиков Н.А. и др. Холодная прокатка шаров малого диаметра в винтовых калибрах// Кузнечно-штамповочное производство.- 1983. - №7. – С. 19-20.
3. Украинец В.В., Федоров В.К., Долгов С.Г. Оборудование для холодной поперечной прокатки деталей малых диаметров валковым инструментом// Кузнечно-штамповочное производство.- 1983. - №7. - С. 20-21.
4. Перетятко В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1// Известия учебных заведений. Черная металлургия. - 2013. - №4. – С. 27-30, <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-4-27-30>
5. Специальные прокатные станы/ А.И. Целиков, М.В. Барбарин, М.В. Васильчиков, др. – М.: Металлургия. 1971. – 336 с.
6. Гайдамака А.В. Підшипники кочення. Навчальний посібник. Харків : НТУУ ХПІ, 2009. – 248 с.
7. Вердевский В.А., Грановский С.П. Эффективная технология и станы для прокатки в винтовых калибрах заготовок под безоблойную штамповку и выдавливание деталей машин// Кузнечно-штамповочное производство.- 1988. - №11. – С. 9-10.
8. А. С. СССР № 1794566. Способ изготовления шариков поперечно-винтовой прокаткой. МКИ В 21 Н 1/14. Заявл. 30.03.89. опубл. 15.02.93, БИ № 06.
9. Рубцов В. Ю. Возможность использования ассиметричных валков шаропрокатных станов для получения устойчивого режима прокатки / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко // НАУКА – ОБРАЗОВАНИЕ – ПРОИЗВОДСТВО: Опыт и перспективы развития: сборник материалов XIV Международной научно-технической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Е. Г. Зудова (8–9 февраля 2018 г.): в 2-х т. — Т. 1: Горно-металлургическое производство. Машиностроение и металлообработка. — Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, - 2018. - С. 106-112.
10. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls / Z. Pater [and etc.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 2013. - Vol. 67. - pp. 1-7.
11. Справочник по листовой штамповке: учебное пособие / В.А. Демин, К.Д. Львович, П.В. Маркин и др.; под ред. В.А. Демина и Е.И. Семенова. – М.: МГИУ, 2011. – 177 с.
12. Бородій Ю.П. Підвищення стійкості ріжучих елементів розділяючих штампів поверхневим зміцненням / Ю.П. Бородій // Вісник НТУУ «ХПІ». Серія машинобудування. – 2010. - № 60. - С. 60-63.