

¹Я. М. Кусий, ²О. В. Личак, ³О. С. Костюк, ⁴Н. А. Кусень, ⁵Б. І. Ширінін, ⁶Н. В. Фариник

¹Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0000-0001-5741-486X,

e-mail: yaroslav.m.kusyi@lpnu.ua

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, ORCID: 0000-0001-5559-1969,

e-mail: olehlychak2003@yahoo.com

³Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0000-0002-3499-2787,

e-mail: olha.s.kostiuk@lpnu.ua

⁴Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0009-0002-8782-3992,

e-mail: nazarii.kusen.mmptm.2023@lpnu.ua

⁵Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: bohdan.shyrinin.mmptm.2022@lpnu.ua

⁶Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: nazar.farynyk.mmptm.2022@lpnu.ua

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.57>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ БРАКУ СТАЛЕВИХ ВИЛИВОК НА ЕТАПІ ЗАГОТІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

© Кусий Я. М., Личак О. В., Костюк О. С., Кусень Н. А., Ширінін Б. І., Фариник Н. В., 2023

Постановка проблеми та мета роботи. Розроблення методів моделювання технологічного процесу підготовки виробництва у життєвому циклі виробів машинобудування є актуальним завданням на цей час. Прогнозування основних показників надійності й експлуатаційних характеристик машинобудівної продукції є пріоритетною характеристикою функціонально орієнтованих технологій. Зокрема, використовуючи математичний апарат ланцюгів Маркова під час розроблення технологічних процесів виготовлення заготовок, можна прогнозувати випуск сталевих блюмів без браку та коректувати терміни процесів лиття. **Методика роботи.** Для етапу заготівельного виробництва було опрацьовано експериментальні результати за запропонованою методикою. Блок-схему та технологічний граф надійності для етапу заготівельного виробництва сталевих блюмів описано системою диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена. **Результати статті.** На підставі розв'язання системи диференціальних рівнянь отримано математичні та графічні залежності для прогнозування ймовірності випуску без браку сталевих блюмів на металургійному підприємстві. **Наукова новизна.** В статті подано приклад оптимізаційного синтезу моделі процесу лиття сталевих блюмів і визначено часовий інтервал із найімовірнішим браком заготовок. Встановлено, що для визначених умов виробництва ймовірність браку реалізується у кратності 4 (≈ 27 днів) відносно найімовірнішого терміну повторного браку у часі при плавках сталі (109 днів). **Практичне значення результатів.** Запропоновану методику можна ефективно використовувати під час розроблення технологічних процесів виготовлення заготовок деталей машин на етапі технологічної підготовки виробництва. **Напрями подальших досліджень за тематикою статті.** Подальші дослідження можуть бути спрямовані на удосконалення запропонованої методики та її поширення на ширшу номенклатуру матеріалів у процесі виготовлення литих заготовок.

Ключові слова: життєвий цикл, технологічний процес, сталевий вилівок, ланцюги Маркова, система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена.

Вступ

Експлуатаційна безпека продукції сучасного машинобудування є пріоритетним критерієм механічного оброблення деталей і складання виробів, що забезпечує оцінку відмов і їхніх наслідків. Поняття ризику застосовують для кількісної оцінки несприятливих подій в процесі виготовлення машинобудівної продукції, що описується ймовірнісним критерієм виникнення небезпек визначеного класу, або обсягом можливих збитків (втрат, пошкоджень) від небажаної події, чи комбінації вказаних величин [1, 2].

Зростання вимог до критеріїв якості машинобудівної продукції ускладнюють вирішення практичних інженерних завдань і потребують розроблення ефективного математичного апарату для їхнього вирішення [3, 4]. Поява нової фундаментальної проблеми – забезпечення гармонійнос-

ті/захищеності (sustainability) об'єктів технічних систем для прогнозування та запобігання відмовам на різних етапах і стадіях життєвого циклу виробів – формує нові характеристики, параметри, нормативно-технічні документи тощо, визначає системний підхід щодо забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності машинобудівних виробів [2, 5].

Аналіз і забезпечення характеристик надійності на етапі виготовлення заготовок деталей машин є одним з актуальних завдань технології машинобудування.

Аналіз літературних джерел

Принципи об'єктно та функціонально орієнтованого проєктування технологічних процесів застосовують для забезпечення параметрів точності, якості поверхонь деталей машин, їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності [5, 6].

Об'єктно орієнтовані технології передбачають покрокове виконання взаємопов'язаних етапів під час виготовлення машинобудівних виробів із застосуванням типових технологічних процесів механічного оброблення та складання виробів. Після визначеного технологічного переходу уточнюють параметри якості функціональної поверхні із врахуванням технологічного успадкування властивостей виробів. Критерієм оптимізації під час проєктування оптимального варіанту технологічного процесу є мінімальна технологічна собівартість механічного оброблення або складання виробу без аналізу його пріоритетних експлуатаційних характеристик [5].

Функціонально орієнтовані технології характеризуються технологічним забезпеченням важливих експлуатаційних характеристик деталей і машин із дотриманням регламентованих технічних вимог [6].

Концепція сталого (гармонійного) виробництва та Індустрії 4.0 вимагають комплексного забезпечення параметрів якості виробів із врахуванням економічних, соціальних критеріїв і забезпечення захисту навколишнього середовища [2, 7]. Це потребує удосконалення методів визначення основних показників надійності деталей і машин для прогнозування їхньої поведінки на важливих етапах і стадіях їхнього життєвого циклу, передусім на етапі заготівельного виробництва.

На підставі аналізу законів розподілу фізичних величин у процесі дослідження зношування металорізальних інструментів, як найслабшої ланки технологічного середовища: верстат-пристрій-інструмент, виявлено [8]:

1) для оцінки раптових відмов металорізального інструменту на етапі технологічної підготовки виробництва доцільно використовувати розподіл Вейбулла-Гніденко або його частковий випадок – експоненціальний закон;

2) для вирішення практичних завдань, експоненціальний розподіл зручніший, оскільки є однопараметричним, моделі на його основі мають аналітичний розв'язок і задовільно описують велику кількість реальних процесів;

3) з теорії надійності відомо, що при експоненціальному розподілі, порівняно з іншими статистичними законами, ймовірність безвідмовної роботи виявляється завжди заниженою, тобто при використанні цього розподілу стають жорсткішими вимоги до надійності будь-якого виробу.

Експоненціальний закон розподілу фізичних величин використовують під час опису фізичних процесів марковськими ланцюгами. Ланцюги Маркова широко застосовують в електромеханіці, електроніці, IT-технологіях для оцінки надійності технічних систем, які складаються із стандартних елементів із відомими характеристиками надійності, зокрема інтенсивності відмов [9-12]. Цей підхід складно реалізувати у технології машинобудування, оскільки типові елементи механічних систем (вали, зубчасті колеса, підшипники тощо) сприймають у різних машинах різні експлуатаційні навантаження. Тому актуальним завданням є розроблення методик аналізу імовірності випуску без браку заготовок виробів для прогнозування впливу елементів технологічних систем на стадіях створення та експлуатації виробів для забезпечення параметрів якості машинобудівних виробів.

Мета

Метою статті є аналіз імовірності випуску без браку сталевих бльомів як однієї з основних характеристик безвідмовності виробів.

Завданнями статті є статистичне опрацювання браку сталевих бльомів на етапі заготівельного виробництва на металургійному підприємстві та розроблення методики аналізу імовірності випуску без браку сталевих бльомів як однієї з основних характеристик безвідмовності виробів з використанням ланцюгів Маркова.

Методика проведення дослідження Застосування матеріало- та енергозберезливих технологій є пріоритетним напрямком мінімізації витрат в умовах зростання цін на енергоносії. Рациональний вибір заготовки та технології її виготовлення значно зменшує собівартість виготовлення деталі та загальну трудомісткість виробничого процесу [13].

Проблема керування якістю машинобудівних виробів охоплює вирішення важливих технологічних завдань на етапах і стадіях їхніх життєвих циклів – від технологічного процесу формування заготовок деталей до складання виробів. Досліджено [14, 15], що вибір раціональних режимів оброблення заготовок деталей залежить від їхніх початкових властивостей. Тому прогнозування випуску бракованої продукції на етапі технологічної підготовки виробництва є важливим завданням технології машинобудування.

Формування початкових виливків на металургійному підприємстві є початковим етапом виготовлення заготовок деталей машин. Досліджено [16], що 3/4 загальних властивостей виробу формується на етапі заливання та кристалізації вилівка в процесі його охолодження.

Результати дослідження та їх обговорення

Для проведення досліджень статистичні результати литва сталевих бльомів за чотири місяці часу отримано на одному з українських металургійних підприємств. Сталеві бльоми відливали на машинах безперервного лиття сталі. Після цього заготовки відправляли у кузню для отримання поковок, де їх піддавали ультразвуковому контролю. Протягом календарного місяці могли як проводитися плавки, так і був період без плавок. В день здійснювалося від 1 до 3-4 плавок.

Технологічна дисципліна на підприємстві висока, вплив людського фактору на випуск бракованої продукції зведений практично до нуля.

Техпроцес отримання бльомів на машинах безперервного лиття заготовок складається із чотирьох етапів: виплавка розплаву у печі ≈ 2 години; позапічна обробка (контроль хімічного складу, домішок тощо) ≈ 2 години; розлив сплаву у форму $\approx 1,75$ години; кристалізація розплаву у формі $\approx 0,5$ години.

Хімічний склад виплавленого матеріалу наведено у табл. 1.

Моделювання процесу литва сталевих бльомів здійснено у середовищі HARRIS/Envі із використанням основних положень теорії надійності технічних систем.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 45ХГМА, %

| Cr | Mn | C | Cu | Ni | Mo | Si | S | P | Fe |
|----------|----------|-----------|------|------|-----------|-----------|------|------|-------|
| 0,75-1,2 | 0,65-1,1 | 0,42-0,49 | 0,35 | 0,25 | 0,15-0,25 | 0,15-0,35 | 0,04 | 0,03 | Решта |

Вхідну інформацію сформовано для днів без браку, днів із браком і днів, в які не проводилися плавки.

Результати отримання браку при плавці сталевих бльомів наведено у табл. 2.

Для моделювання процесу отримання браку в процесі формування сталевих бльомів застосовано математичний апарат ланцюгів Маркова [14, 15].

Оптимізаційний синтез при розв'язанні заданої технологічної задачі передбачає виконання таких етапів [1]:

- розроблення блок-схеми надійності для аналізу заготівельного виробництва сталевих виливок та побудова технологічного графу надійності, що описують ланцюгами Маркова;
- розроблення системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для заданого технологічного графу надійності та її розв’язок із використанням початкових умов;
- визначення граничного значення ймовірності випуску без браку сталевих блюмів $P(t)$ по місяцях та розроблення практичних рекомендацій стосовно коректування термінів плавки.

Таблиця 2

Статистика браку сталевих блюмів на етапі заготівельного виробництва у 2020 р.

| | Загальна кількість плавок $N_{пл.}$ | Загальна кількість блюмів $N_{бл.}$ | Кількість бракованих блюмів $m_{бл.}$ | Кількість блюмів в одній плавці $N_{бл.1пл.}$ |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Червень | 50 | 286 | 11 | 6 |
| Липень | 63 | 394 | 41 | 8 |
| Серпень | 55 | 448 | 12 | 9 |
| Вересень | 39 | 216 | 12 | 9 |
| Разом | 207 | 1344 | 76 | 32 |

Блок-схему надійності для аналізу заготівельного виробництва сталевих виливок та технологічний граф надійності, описаний ланцюгами Маркова, наведено на рис. 1, а і 1, б відповідно.

На рис. 1, а використано умовні позначення: ТСЗВ – технологічне середовище заготівельного виробництва, яке складається із основного технологічного обладнання, технологічного оснащення для виплавки початкових заготовок; $Y_{0(1)}, \dots, Y_{0(n)}$; $Y_{зар.(1)}, \dots, Y_{зар.(m)}$ – відповідно початкові параметри напівфабрикатів (відправної сировини) для етапу заготівельного виробництва та кінцеві параметри заготовок виробів; $Y_{ТСЗВ(1)}, \dots, Y_{ТСЗВ(k)}$ – множина параметрів елементів технологічного середовища заготівельного виробництва; $\lambda_{ЗВ}$ – інтенсивність відмов для даного етапу заготівельного виробництва сталевих виливок.

На рис. 1, б вершини технологічного графу надійності для етапу заготівельного виробництва характеризують два можливі стани технічної системи: стан 1 – у процесі плавлення сталевих заготовок брак відсутній на етапі заготівельного виробництва; стан 2 – у процесі плавлення сталевих заготовок брак наявний на етапі заготівельного виробництва.

Позначення ймовірностей здійснення сумісних подій (рис. 1) $P_1(t)$ – ймовірність знаходження технічної системи у стані 1 за відсутності браку на етапі заготівельного виробництва; $P_2(t)$ – ймовірність знаходження технічної системи у стані 2 за наявності браку на етапі заготівельного виробництва.

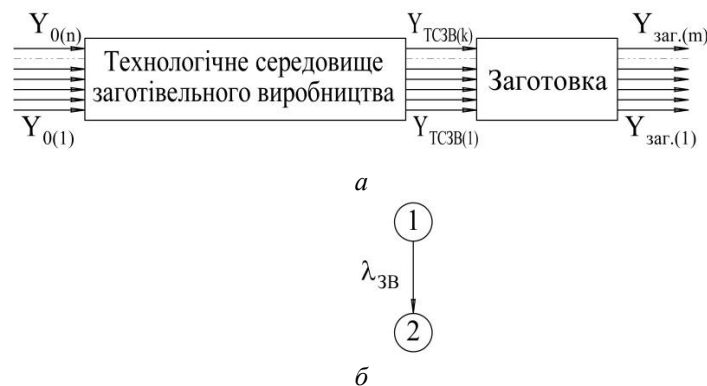


Рис. 1. Блок-схема надійності для етапу заготівельного виробництва та його технологічний граф надійності, що описують ланцюгами Маркова

Fig. 1. Reliability flowchart for the blanks production stage and its technological reliability graph described by Markov chains

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для розробленого технологічного графа надійності (рис. 1, б) із врахуванням впливу елементів ТСЗВ на забезпечення необхідних параметрів якості машинобудівного виробу для етапу заготівельного виробництва [16, 17]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{3B} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{3B} \cdot P_1(t), \\ P_1(t) + P_2(t) &= 1. \end{aligned} \tag{1}$$

Інтенсивність відмов λ [16]:

$$\lambda = \frac{1}{T_0}, \tag{2}$$

де T_0 – напрацювання до відмови, год.

$$T_0 = \frac{N_{пл.} \cdot T_{пл.} \cdot \frac{N_{бл.}}{N_{бл.1пл.}}}{n_{бл.}}, \tag{3}$$

де $T_{пл.}$ – час однієї плавки; приймаємо $T_{пл.}=6,25$ год.

Результати розрахунку зводимо у табл. 3.

Таблиця 3

Розрахунок напрацювання до відмови та інтенсивності відмов при плавці сталевих заготовок з червня по жовтень 2020 р.

| № з/п | Місяць | Напрацювання до відмови T_0 , год | Інтенсивність відмов λ , 1/год |
|-------|----------|-------------------------------------|--|
| 1 | Червень | 1354,167 | $7,385 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | Липень | 472,98 | $2,114 \cdot 10^{-3}$ |
| 3 | Серпень | 1425,926 | $7,013 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | Вересень | 531,818 | $1,88 \cdot 10^{-3}$ |

Ймовірність випуску без браку сталевих блюмів по місяцях наведено на рис. 2.

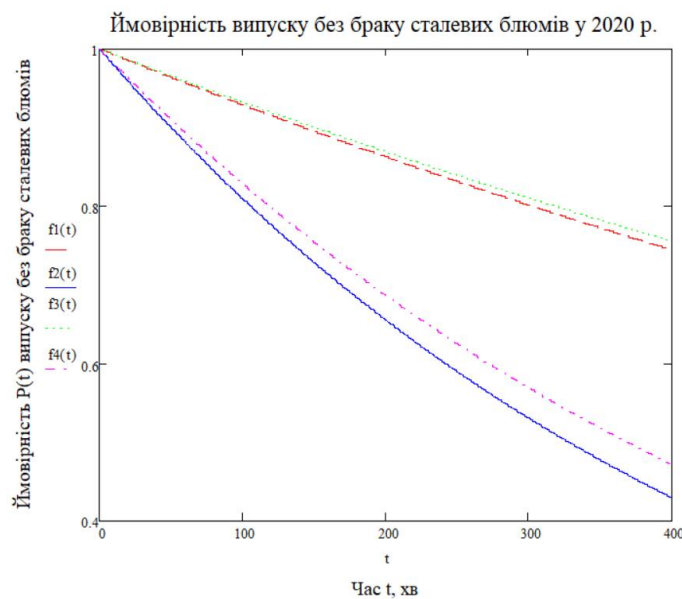


Рис. 2. Ймовірність випуску без браку сталевих блюмів у червні-вересні 2020 р. ($f_1(t)$ – червень 2020 р.; $f_2(t)$ – липень 2020 р.; $f_3(t)$ – серпень 2020 р.; $f_4(t)$ – вересень 2020 р.)
 Fig. 2. Probability of production without shortage of steel blooms in June 2020-September 2020 ($f_1(t)$ – June 2020 ; $f_2(t)$ – July 2020; $f_3(t)$ – August 2020; $f_4(t)$ – September 2020)

Відправний графік за результатами досліджень наведено на рис. 3. Очищений від «шумів» графік ймовірності прогнозування браку у часі наведено на рис. 4. По осі ОХ – відкладені дні плавки; по осі ОУ – ймовірність браку $0 \leq P(t) \leq 1$.

Середньоквадратичну похибку визначення коефіцієнта кореляції розраховують за формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{I}{N-I} \cdot (1 - Y_{\text{сер.}}^2)^2}, \quad (4)$$

де $Y_{\text{сер.}}$ – середнє значення за результатами вимірювань; N – загальне число вимірювань.

Розрахована середньоквадратична похибка визначення коефіцієнта кореляції при $P(t)_{\text{сер.}} = 0,54$ і $N=248$ дорівнює 0,45.

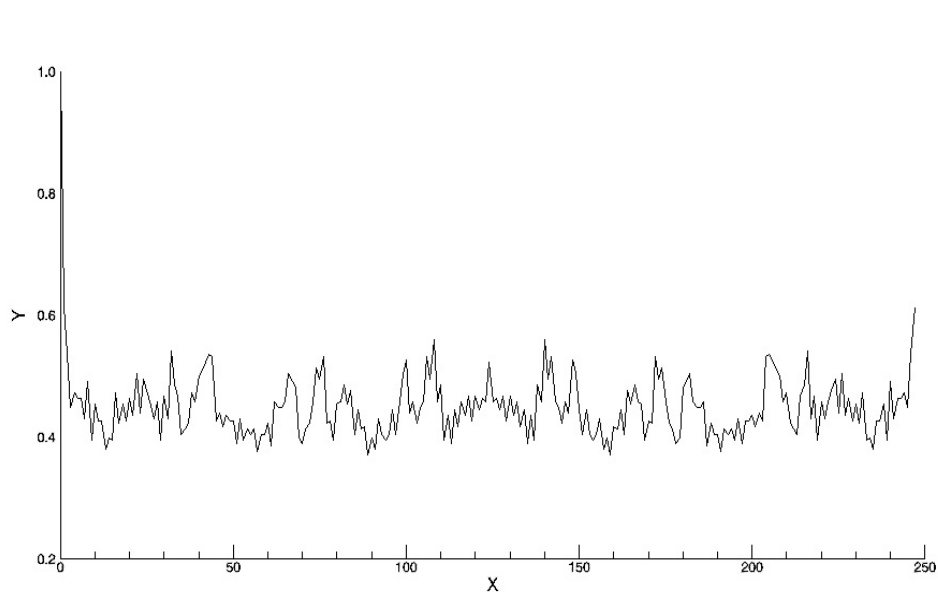


Рис. 3. Відправний графік ймовірності повторного браку у часі при плавках сталі (шкала по горизонталі наведена у числі днів)

Fig. 3. Initial graph of the probability of repeated failure in time for steel melting (the horizontal scale is given in the number of days)

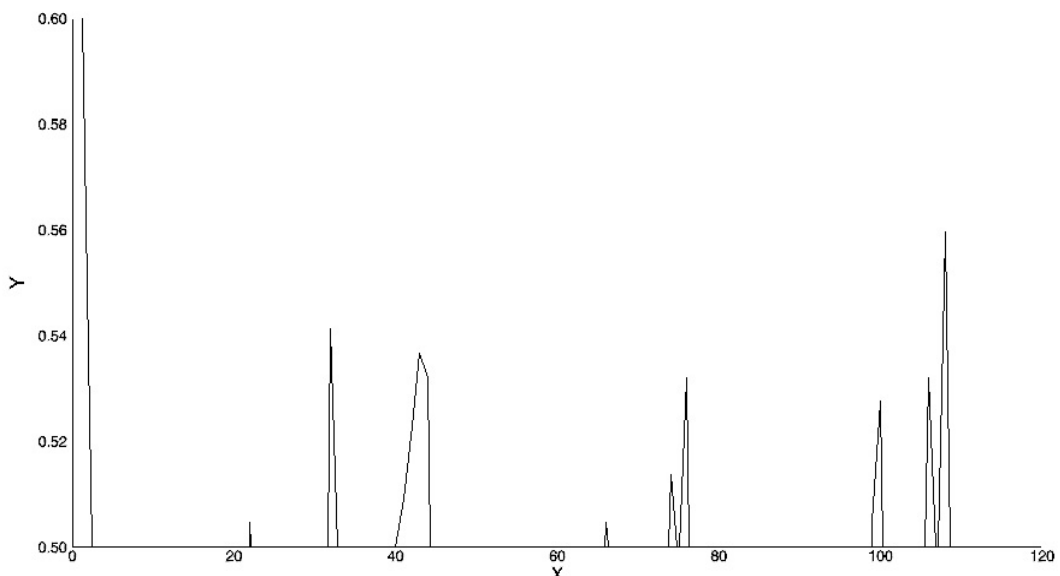


Рис. 4. Графік ймовірності повторного браку у часі при плавках сталі

Fig. 4. Graph of the probability of repeated shortage over time in steel melting

На рис. 4 стійкі моди (із меншим значенням величини) згідно із синергетичним підходом підпорядковуються нестійким модам, які виходять з лімітованого діапазону середньоквадратичної похибки для коефіцієнта кореляції [1].

Висновки

Отримані результати опрацювання статистичних даних виникнення браку при плавці сталевих блюмів дають підстави зробити такі висновки.

При моделюванні процесу формоутворення виливок на етапі заготівельного виробництва на основі емпіричних залежностей по місяцях плавки отримано ймовірності прогнозування браку із використанням експоненціального закону розподілу (рис. 2).

Оскільки отримані результати прогнозування браку сталевих блюмів по місяцях є неоднозначними (у червні, серпні прогнозована ймовірність браку у 1,59–1,72 рази менша, ніж у липні, вересні), то додатково змодельовано процес повторного браку виливок по місяцях плавки (рис. 3) із отриманням піків наймовірнішого отримання браку через визначений проміжок часу (рис. 4).

Піки по осі ординат (дні): 32; 44; 76; 100; 106; 109 – проблемні дні або кратні проблемним дням часові інтервали, в які найймовірніший брак блюмів. Важливе значення має початок відліку проблемних днів, в які прогнозується брак заготовок.

За найбільшим серед піків, що перевищує межі похибки (109 днів), вдалося спрогнозувати випуск бракованої продукції у визначені критичні дні за наступні кілька місяців у визначеному періоді. На підставі експериментальних досліджень у реальних виробничих умовах підтверджено гіпотезу, що ймовірність браку відносно найбільшого піку (109 днів), реалізується у кратності 4 (≈ 27 днів), що відповідає періоду обертання Місяця навколо Землі.

Список літератури

1. Кусий Я. М. *Науково-прикладні основи технологічного успадкування параметрів якості для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08.* – Львів, 2021. – 432 с. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/dissertation/16474/dysertdsckusyiyaroslav.pdf>
2. Davim J.P. *Surface Integrity in Machining. Materials Forming, Machining and Tribology.* – Cham, Springer International Publishing AG, 2017 – 82 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51961-6>
3. Liao Z., la Monaca A., Murray J., Speidel A., Ushmaev D., Clare A., Axinte D., M'Saoubi R. Surface integrity in metal machining - Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2021. – Vol. 162. – 103687. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687>
4. la Monaca A., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte A., Hardy M.C., Clare A.T. Surface integrity in metal machining - Part II: Functional performance // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2021. – Vol. 164. – 103718. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718>
5. Stupnytskyy V. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).* – 2013. – Vol. 2. – pp. 1181-1186. URL: <https://www.ijert.org/research/features-of-the-functionally-oriented-engineering-technologies-in-concurrent-environment-IJERTV2IS90435.pdf>
6. Stupnytskyy V. Computer-aided conception for planning and researching of the functional-oriented manufacturing process // *Advanced Manufacturing Processes, part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering.* – 2020. – pp. 309–320. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_32
7. Cocco P., Marciano F., Rossi D., Alberti M. Business Software Offer for Industry 4.0: the SAP case // *IFAC-PapersOnLine.* – 2018. – Vol. 51, no 11. – pp. 1200–1205. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.427>
8. Klocke F. *Manufacturing Processes: Cutting.* – Berlin, Springer-Verlag, 2011. – 506 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>
9. Nyberg P., Frisk E., Nielsen L. Generation of Equivalent Driving Cycles Using Markov Chains and Mean Tractive Force Components // *IFAC Proceedings.* – 2014. – Vol. 47, no 3. – pp. 8787–8792. URL: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02239>

10. Gruosso G., Mion A., Gajani G.S. Forecasting of electrical vehicle impact on infrastructure: Markov chains model of charging stations occupation // *eTransportation*. – 2020. – Vol. 6. – 100083. URL: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100083>
11. Yakovyna V., Seniv M., Symets I., Sambir N. Algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2020. – Vol. 4. – pp. 163-177. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-16>
12. Yakovyna V., Symets I. Reliability assessment of CubeSat nanosatellites flight software by high-order Markov chains // *Procedia Computer Science*. – 2021. – Vol. 192. – pp. 447-456. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.046>
13. Birolini A. *Reliability Engineering: Theory and Practice*. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 626 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05409-3>
14. Di Bona G., Silvestri A., Forcina A., Petrillo A. Total efficient risk priority number (TERPN): a new method for risk assessment // *Journal of Risk Research*. – 2018. – Vol. 21, no 2. – pp. 1384-1408. URL: <https://doi.org/10.1080/13669877.2017.1307260>
15. Stupnytskyy V., Hrytsay I. Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology // *Archive of mechanical engineering*. – 2020. – Vol. 67, no 2. – pp. 1–19. URL: <https://doi.org/10.24425/ame.2020.131688>
16. Kusyi Ya, Stupnytskyy V, Onysko O, Dragašius E, Baskutis S., Chatys, R. Optimization synthesis of technological parameters during manufacturing of the parts // *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. – 2022. – Vol. 24, no 4. – pp. 655-667. URL: <https://doi.org/10.17531/ein.2022.4.6>
17. Kusyi Y., Kostiuk O., Kuk A., Attanasio A., Cocca P. Optimization of cutting modes during sustainable machining of products based on economic criteria // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2024. – P. 167–181. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_16

Yaroslav Kusyi¹, Oleh. Lychak², Olha Kostiuk¹, Nazarii Kusen¹, Bohdan Shyrinin¹, Nazar Farynyk¹

¹Lviv Polytechnic National University

²Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

INVESTIGATION OF THE PROBABILITY OF STEEL CASTINGS SHORTAGE AT THE STAGE OF BLANKS PRODUCTION

Problem statement and the research purpose. Now the development of methods of the technological process modeling for production preparation in the life cycle of mechanical engineering products is an actual task. Forecasting the main indicators of reliability and operational characteristics of mechanical engineering products is a priority characteristic of functionally-oriented technologies. In particular, using the mathematical apparatus of Markov chains during the development of technological processes for the production of blanks, it is possible to predict the production of steel blooms without defects and correct the terms of casting processes. **Methodology of the study.** The experimental results were processed according to the proposed methodology for the blanks production stage. The system of Kolmogorov–Chapman differential equations describes the created reliability flowchart and technological graph of reliability for the stage of procurement production of steel blooms. **Results of the investigations.** Mathematical and graphical dependencies for forecasting the probability of production without a shortage of steel blooms at a metallurgical enterprise were obtained based on the solution of a system of differential equations. **Scientific novelty.** The article presents an example of the optimization synthesis of the model of the casting process of steel blooms and the determined time interval with the most likely shortage of blanks. It was established that for the defined production conditions, the probability of failure is realized in a multiple of 4 (≈ 27 days) relative to the most likely term of repeated shortage over time for steel melting (109 days). **Practical value of the results.** The proposed technique can be effectively used during the development of technological processes for blanks production of machine parts at the technological preparation stage of production. **Scopes of further investigations on the subject of the paper.** Further research can be aimed at improving the proposed methodology and extending it to a wider range of materials in the process of castings manufacturing.

Keywords: Life cycle, technological process, steel casting, Markov chains, system of Kolmogorov-Chapman differential equations.

References

1. Kusiya Ya. Naukovo-prykladni osnovy tekhnolohichnoho uspadkuvannya parametriv yakosti dlia zabezpechennia ekspluatatsiinykh kharakterystyk vyrobiv: dys. ... doktora tekhn. nauk: 05.02.08.0020 [Scientific and Applied Basics of the Technological Inheritability of the Quality Parameters for Providing of the Products Operation Characteristics. – On rights of a manuscript. Thesis for doctor degree in technical sciences by speciality 05.02.08 - mechanical engineering.] – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – 383 p. [in Ukrainian].
<https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/dissertation/16474/dysertdsekusiyaroslav.pdf>
2. Davim J.P. Surface Integrity in Machining. Materials Forming, Machining and Tribology. – Cham, Springer International Publishing AG, 2017 – 82 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51961-6>
3. Liao Z., la Monaca A., Murray J., Speidel A., Ushmaev D., Clare A., Axinte D., M'Saoubi R. Surface integrity in metal machining - Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2021. – Vol. 162. – 103687.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687>
4. la Monaca A., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte A., Hardy M.C., Clare A.T. Surface integrity in metal machining - Part II: Functional performance // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2021. – Vol. 164. –103718. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718>
5. Stupnytskyy V. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2013. – Vol. 2. – pp. 1181-1186.
<https://www.ijert.org/research/features-of-the-functionally-oriented-engineering-technologies-in-concurrent-environment-IJERTV2IS90435.pdf>
6. Stupnytskyy V. Computer-aided conception for planning and researching of the functional-oriented manufacturing process // Advanced Manufacturing Processes, part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – pp. 309–320. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_32
7. Cocca P., Marciano F., Rossi D., Alberti M. Business Software Offer for Industry 4.0: the SAP case // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, no 11. – pp. 1200–1205. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.427>
8. Klocke F. Manufacturing Processes: Cutting. – Berlin, Springer-Verlag, 2011. – 506 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>
9. Nyberg P., Frisk E., Nielsen L. Generation of Equivalent Driving Cycles Using Markov Chains and Mean Tractive Force Components // IFAC Proceedings. – 2014. – Vol. 47, no 3. – pp. 8787–8792. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02239>
10. Gruosso G., Mion A., Gajani G.S. Forecasting of electrical vehicle impact on infrastructure: Markov chains model of charging stations occupation // eTransportation. – 2020. – Vol. 6. – 100083. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100083>
11. Yakovyna V., Seniv M., Symets I., Sambir N. Algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2020. – Vol. 4. – pp. 163-177. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-16>
12. Yakovyna V., Symets I. Reliability assessment of CubeSat nanosatellites flight software by high-order Markov chains // Procedia Computer Science. – 2021. – Vol. 192. – pp. 447-456. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.046>
13. Birolini A. *Reliability Engineering: Theory and Practice*. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 626 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05409-3>
14. Di Bona G., Silvestri A., Forcina A., Petrillo A. Total efficient risk priority number (TERPN): a new method for risk assessment // Journal of Risk Research. – 2018. – Vol. 21, no 2. – pp. 1384-1408. <https://doi.org/10.1080/13669877.2017.1307260>
15. Stupnytskyy V., Hrytsay I. Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology // Archive of mechanical engineering. – 2020. – Vol. 67, no 2. – pp. 1–19. <https://doi.org/10.24425/ame.2020.131688>
16. Kusiya Ya, Stupnytskyy V, Onysko O, Dragašius E, Baskutis S., Chatys, R. Optimization synthesis of technological parameters during manufacturing of the parts // Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. – 2022. – Vol. 24, no 4. – pp. 655-667. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.4.6>
17. Kusiya Y., Kostiuk O., Kuk A., Attanasio A., Cocca P. Optimization of cutting modes during sustainable machining of products based on economic criteria // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2024. – P. 167–181. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_16