

Методичні вказівки
для виконання практичних занять
«Моделювання підйомно-транспортних механізмів з
використанням рівнянь регресії для забезпечення
безпечного функціонування» здобувачами
спеціальностей 132 «Матеріалознавство»
та 133 «Галузеве машинобудування»

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Методичні вказівки
для виконання практичних занять
«Моделювання підйомно-транспортних механізмів з
використанням рівнянь регресії для забезпечення
безпечного функціонування» здобувачами
спеціальностей 132 «Матеріалознавство»
та 133 «Галузеве машинобудування»

Вінниця
ВНТУ
2024

Рекомендовано до видання Радою з якості освіти Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 23.09.2024 р.)

Рецензенти:

Л. Г. Козлов, доктор технічних наук, професор

І. Ю. Кириця, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки для виконання практичних занять «Моделювання підйомно-транспортних механізмів з використанням рівнянь регресії для забезпечення безпечного функціонування» здобувачами спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 133 «Галузеве машинобудування» [Електронний ресурс] / уклад. : О. В. Березюк, В. І. Савуляк. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 45 с.

У методичних вказівках розглянута методика виконання практичних занять «Моделювання підйомно-транспортних механізмів з використанням рівнянь регресії для забезпечення безпечного функціонування». Наведені послідовність та рівняння для моделювання роботи приводів робочих органів з метою визначення їх зносу, впливу на параметри технологічного процесу для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечення безпеки і надійності роботи. Розраховані на студентів вищих навчальних закладів під час підготовки магістрів та аспірантів спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 133 «Галузеве машинобудування».

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Вплив хімічного складу матеріалу шнека на його знос	5
2 Вплив зносу шнека на параметри процесу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі.....	8
3 Визначення необхідної твердості поверхні шнека за величиною його зносу.....	12
4 Приклад виконання практичних занять	16
Контрольні запитання	17
Список використаної літератури	18
Додаток А Варіанти завдань	21
Додаток Б Хімічний склад сталей та сплавів	22
Додаток В Механічні властивості сталі без термічної обробки.....	29
Додаток Г Механічні властивості сталі після термічної обробки.....	37

Вступ

Одним з важливих завдань машинобудування є підвищення зносостійкості і надійності деталей підйомно-транспортних машин, які впливають на безпеку їхньої роботи через можливі поломки, що можуть призвести до виробничого травматизму обслуговуючого персоналу. Використання в методичних вказівках для прикладу моделювання приводів для зневоднення твердих побутових відходів (ТПВ), яке супроводжується попереднім ущільненням та частковим подрібненням під час завантаження у сміттєвоз, дозволяє наглядно продемонструвати можливості опису складних процесів та суттєво неоднорідних матеріалів, детально розглянути методику застосування регресійного аналізу. Зневоднення ТПВ у сміттєвозі здійснюється за допомогою конічного шнека, деталі якого внаслідок тертя піддається інтенсивному зносу. Це обумовлено тим, що ТПВ містять у своєму складі, зокрема такі компоненти як метал, скло, каміння, кераміка, кістки, полімерні матеріали, які можна віднести до абразивних матеріалів, оскільки вони мають різну форму, розмір і твердість, а наявність вологи обсягом 39-92% в ТПВ створює агресивне середовище, що призводить до корозійно-механічного зношування всіх механізмів, зменшення ресурсу, терміну його експлуатації, а також збільшенню витрат на процес зневоднення.

Інтенсивність вказаних процесів залежить від співвідношення твердості і міцності металу та абразивних складових ТПВ. При зміні цього співвідношення на користь абразиву превалює зношування металу; якщо метал виявляється міцнішим – на передній план виходить руйнування абразиву [1]. На сьогодні резерви підвищення зносостійкості високоміцних сталей технологічними методами – термічної обробки, легування, пластичної деформації майже вичерпані. У зв'язку з цим перспективи подальшого підвищення безпечності експлуатації механізмів та приводів устаткування вбачаються у застосуванні нових матеріалів та композитів, а також методів прогнозування настання критичного стану, що межує з руйнуванням, внаслідок тертя та зношування.

Фахівці з проєктування та експлуатації техніки при розробці нового обладнання та його експлуатації повинні визначати швидкість зношування та силові характеристики тертя сталей в абразивному та корозійному (кислотному) середовищі, що дозволить адекватно прогнозувати граничний стан та терміни його безпечного функціонування, робити правильний вибір матеріалів та їх термічної обробки [2], зокрема під час зневоднення ТПВ [3-6].

Тому освоєння сучасних методів моделювання з використанням регресійних формул в інженерних застосуваннях безумовно підвищить якість проєктування, довговічність та безпечність експлуатації нового обладнання.

1 Вплив хімічного складу матеріалу шнека на його знос

Експериментальні результати зносу шнека для різного хімічного складу його матеріалу та шляху тертя наведені в табл. 1 [7].

Таблиця 1 – Значення зносу шнека для різного хімічного складу його матеріалу та шляху тертя [7]

№	Марка матеріалу шнека	Вміст в матеріалі шнека, %			Знос, мкм для шляху тертя, м			
		вуглецю С	хрому Cr	марганцю Mn	3000	6000	9000	12000
1	сталь 45	0,45	0,25	0,65	53	103	153	203
2	сталь У8	0,8	0,2	0,25	48	91	134	177
3	сталь ШХ15	1	1,5	0,3	43	80	116	152
4	сталь Х12	2,1	12	0,3	39	72	105	138

Попередня обробка [8, 9] результатів експериментальних досліджень [7] показала, що знос гартованого шнека є функцію таких 4-х основних параметрів:

$$u = f(C_C, C_{Cr}, C_{Mn}, s), \quad (1)$$

де u – знос шнека, мкм;

C_C, C_{Cr}, C_{Mn} – вміст вуглецю, хрому, марганцю в матеріалі шнека, відповідно, %;

s – шлях тертя, м.

Дослідження впливу перерахованих вище факторів на знос гартованого шнека при обробці результатів однофакторних експериментів методом регресійного аналізу пов'язаний із значними труднощами і об'ємами робіт. Тому проведено багатофакторний експеримент для отримання рівняння регресії для функції відгуку – зносу гартованого шнека за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування експерименту другого порядку методом Бокса-Уїлсона [10] з використання розробленої комп'ютерної програми «PlanExp», яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [11] і детально описана в роботі [12].

На основі даних табл. 1, використовуючи ротатбельне центральне композиційне планування експерименту другого порядку, застосовуючи розроблене програмне забезпечення, що захищене свідоцтвом на твір, після відкидання за критерієм Стюдента незначимих факторів та ефектів взаємодій, визначено закономірність зносу шнека залежно від хімічного складу його матеріалу та шляху тертя [13]

$$u = 95 - 7,467 C_C - 72,39 C_{Cr} - 1782 C_{Mn} + 0,0344 s - 0,02148 C_C s + 0,00214 C_{Cr} s - 0,01323 C_{Mn} s + 352,5 C_C^2 - 3,065 C_{Cr}^2 + 2405 C_{Mn}^2 \quad (2)$$

Шлях тертя для поверхні шнека зневоднення визначається за формулою [14]:

$$s = \frac{\pi d_{cp} n_{opt} t_{ц} K_{ц} n_k}{26 \cdot 60} \text{ [М]}, \quad (3)$$

де d_{cp} – середній діаметр шнека на останньому витку, м;

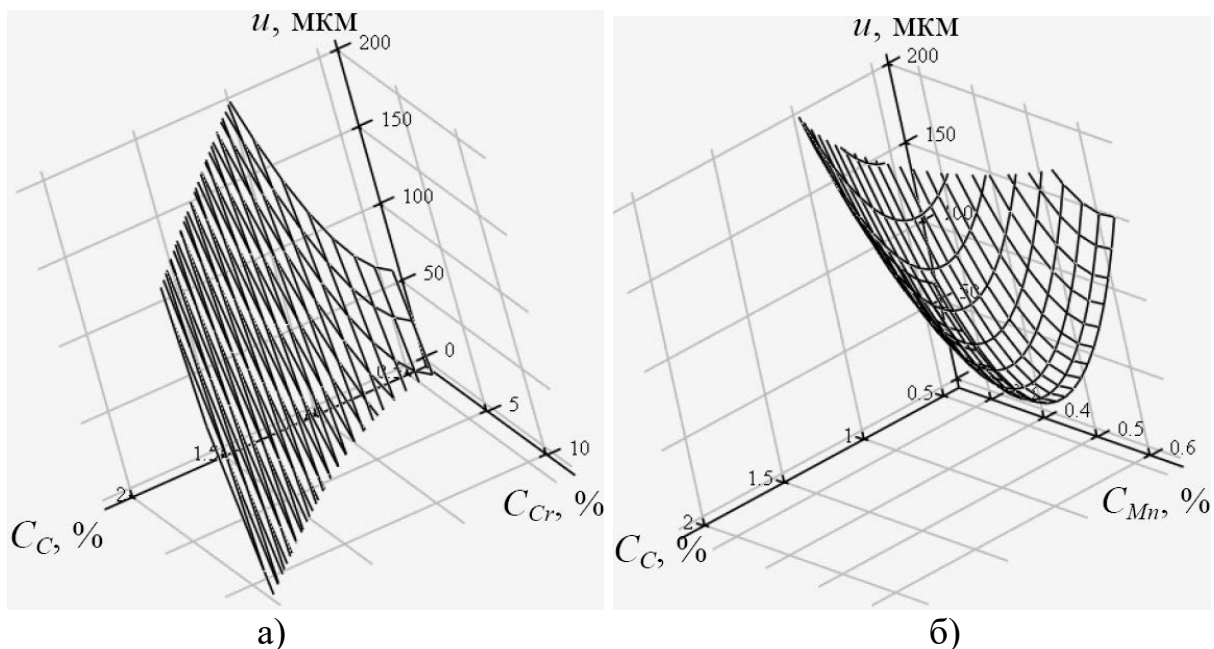
n_{opt} – оптимальна частота обертання шнека, об/хв;

$t_{ц}$ – тривалість робочого циклу зневоднення одного контейнера ТПВ, с;

$K_{ц}$ – річна кількість робочих циклів сміттевоза із урахуванням зневоднення ТПВ, шт;

n_k – кількість контейнерів з ТПВ, що завантажуються в кузов сміттевоза за один цикл із урахуванням зневоднення, шт.

На рис. 1 показано поверхні відгуків цільової функції – зносу шнека u та її двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, побудовані за допомогою закономірності (2), які дозволяють наглядно проілюструвати вказану залежність.



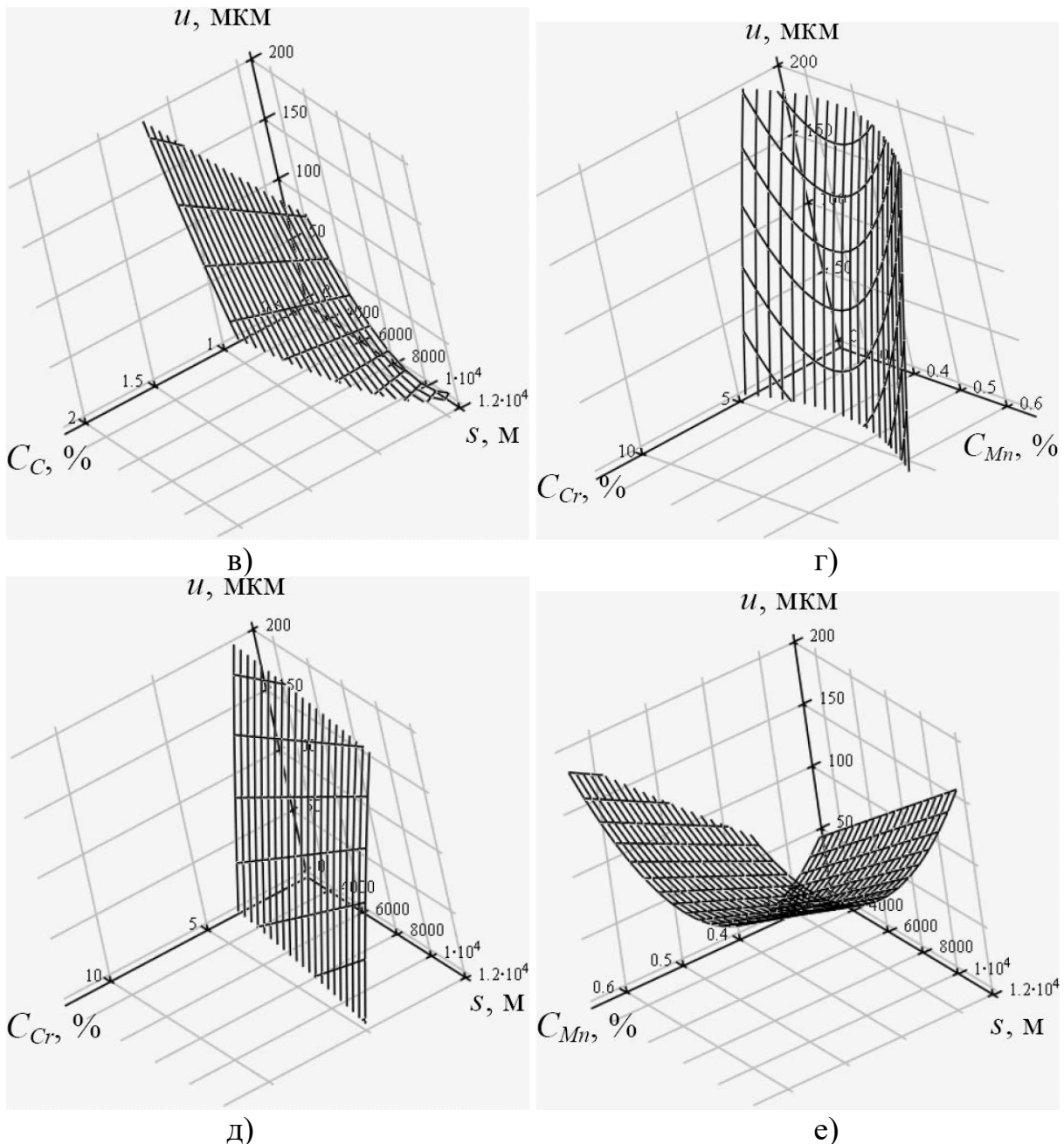


Рисунок 1 – Поверхні відгуків цільової функції – знос шнека u в площинах параметрів впливу (а) – $u = f(C_C, C_{Cr})$, (б) – $u = f(C_C, C_{Mn})$, (в) – $u = f(C_C, s)$, (г) – $u = f(C_{Cr}, C_{Mn})$, (д) – $u = f(C_{Cr}, s)$, (е) – $u = f(C_{Mn}, s)$.

Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (2) можна вважати правильною з 95%-ю достовірністю. Коефіцієнт множинної кореляції склав $R = 0,999994$, що свідчить про високу точність одержаних результатів.

За критерієм Стюдента встановлено, що серед досліджених факторів впливу (хімічного складу сталі) найбільше на знос шнека впливає вміст вуглецю, а найменше – вміст марганцю.

2 Вплив зносу шнека на параметри процесу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі

На рис. 2 представлена розрахункова схема приводу зневоднення ТПВ у сміттєвозі, на якій позначено такі елементи та величини: ГМ – гідромотор, ДР – дросель, Н – гідронасос, ПК – переливний клапан, Ф – фільтр, Б – бак із робочою рідиною, p_1, p_2, p_3 – тиски відповідно на виході насоса, на вході гідромотора, на виході гідромотора; W_1, W_2, W_3 – об'єми трубопроводів між насосом та дроселем, дроселем та гідромотором, гідромотором та фільтром; Q_H – фактична подача насоса; S_{DR} – площа прохідного отвору дроселя; S_ϕ – площа поверхні фільтруючого елемента; q_M – робочий об'єм гідромотора; J – момент інерції на валу гідромотору; M_{KP} – крутний момент технологічного навантаження на валу гідромотора; ω – кутова швидкість валу гідромотора.

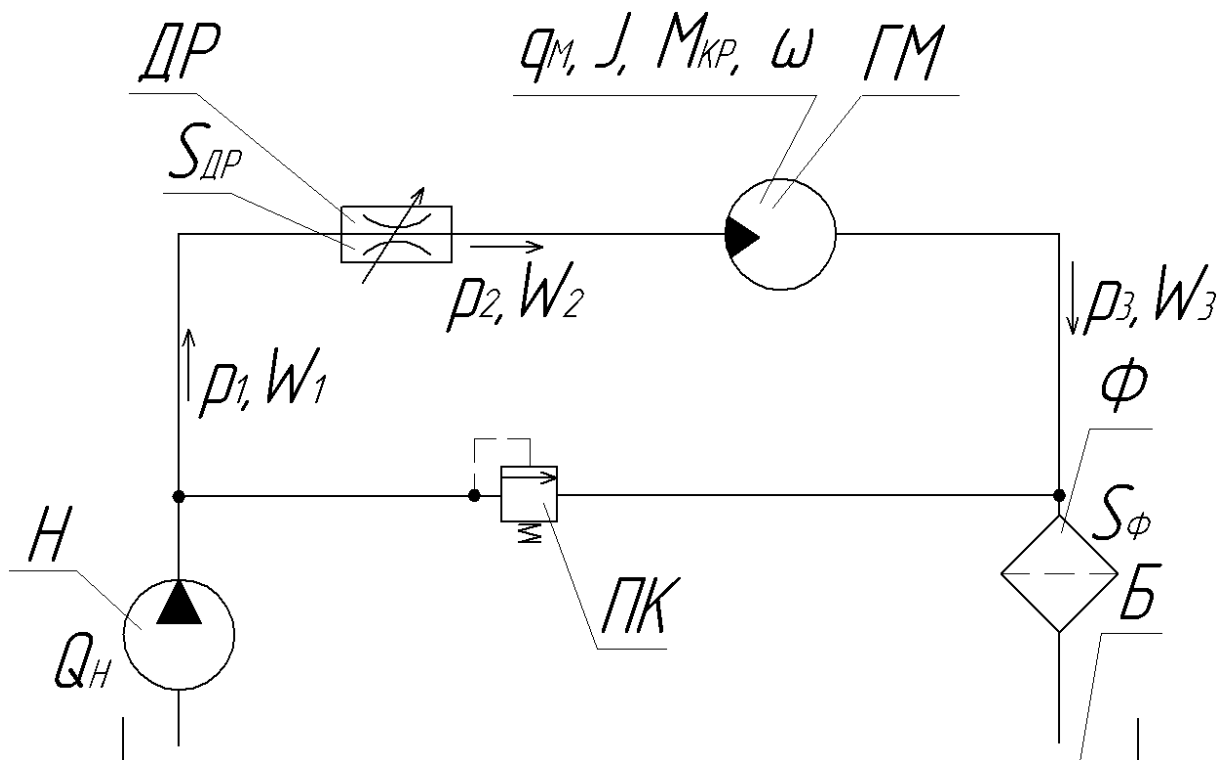


Рисунок 2 – Розрахункова схема приводу зневоднення ТПВ у сміттєвозі

Робота приводу зневоднення ТПВ у сміттєвозі із урахуванням зносу шнека може бути описана відповідною системою диференціальних рівнянь (4 – 7) з відповідними граничними умовами (8) та алгебраїчного рівняння (9) [8]:

$$Q_H = \mu S_{DP} \sqrt{2(p_1 - p_2) / \rho} + \sigma(p_1 - p_2) + KW_1 \dot{p}_1; \quad (4)$$

$$\mu S_{DP} \sqrt{2(p_1 - p_2) / \rho} = q_{MX} \omega + \sigma(p_2 - p_3) + KW_2 \dot{p}_2; \quad (5)$$

$$q_{MX} \omega = k_\phi S_\phi p_3 / \mu_D + \sigma p_3 + KW_3 \dot{p}_3; \quad (6)$$

$$q_{MX}(p_2 - p_3) = \{L_{ш} \rho_0 (\bar{T} + 2u)^2 [(\bar{D} - 2u)^2 - (\bar{d} - 2u)^2] / (16\pi) + \\ + \pi \rho_{ш} [n_B (h - 2u) (\bar{D} - \bar{d}) [(\bar{D} - 2u)^2 - (\bar{d} - 2u)^2] \times \\ \times \sqrt{\pi^2 (\bar{D} + \bar{d} - 4u)^2 + 4(\bar{T} + 2u)^2 + L_c (\bar{d} - 2u)^4} / 32\} \dot{\omega} + \beta \omega + \\ + \alpha q_{MX} (p_2 + p_3) + 30 \{12231 + 109,8 w_0 - 0,7676 \rho_0 + 27,45 n + \\ + 91602 (\Delta_{ш} + u) / (D_{\min} - 2u) - 41610 (d_{\min} - 2u) / (D_{\min} - 2u) - \\ - 0,2475 w_0 n + 558,6 w_0 (\Delta_{ш} + u) / (D_{\min} - 2u) - 260,9 w_0 (d_{\min} - 2u) \div \\ \div (D_{\min} - 2u) - 7,713 \rho_0 (d_{\min} - 2u) / (D_{\min} - 2u) - 165174 [(\Delta_{ш} + u) \div \\ \div (D_{\min} - 2u)] [(d_{\min} - 2u) / (D_{\min} - 2u)] + 0,7082 w_0^2 + 0,009383 \rho_0^2 - \\ - 0,0726 n^2 + 40815 [(d_{\min} - 2u) / (D_{\min} - 2u)]^2\} / (\pi n); \quad (7)$$

$$0 \leq \{p_1, p_2, p_3\} \leq p_{зк}; \quad 0 \leq \omega; \quad (8)$$

$$q_{MX} = q_M / (2\pi), \quad (9)$$

де $L_{ш}$ – довжина шнека, м;

ρ_0 – початкова густина ТПВ, кг/м³;

\bar{T} – усереднений крок витків конічного шнека, м;

u – знос шнека, м;

\bar{D} – усереднений зовнішній діаметр шнека, м;

\bar{d} – усереднений діаметр осердя шнека, м;

$\rho_{ш}$ – густина матеріалу шнека, кг/м³;

n_B – кількість витків шнека;

h – товщина витка, м;

L_c – довжина осердя шнека, м;

w_0 – початкова відносна вологість ТПВ, %;

n – номінальна частота обертання шнека, об/хв;

$\Delta_{ш}$ – радіальний зазор між шнеком та корпусом, м;

D_{\min} – зовнішній діаметр шнека на останньому витку, м;

d_{\min} – діаметр осердя шнека на останньому витку, м;

q_{MX} – радіальний робочий об'єм гідромотора, м³.

Результати чисельного дослідження математичної моделі (4 – 9) показані на рис. 3, де цифрами 1 – 6 позначено криві, які відповідають таким значенням зносу шнека: 0, 150, 300, 450, 600, 750 мкм, відповідно. Як видно із рис. 3, зі збільшенням зносу шнека зростає тиск робочої рідини на вході гідромотора, а кутова швидкість і частота обертання шнека

суттєво знижується. Це не тільки впливає на ефективність роботи обладнання, але і підвищує ймовірність поломок та аварій.

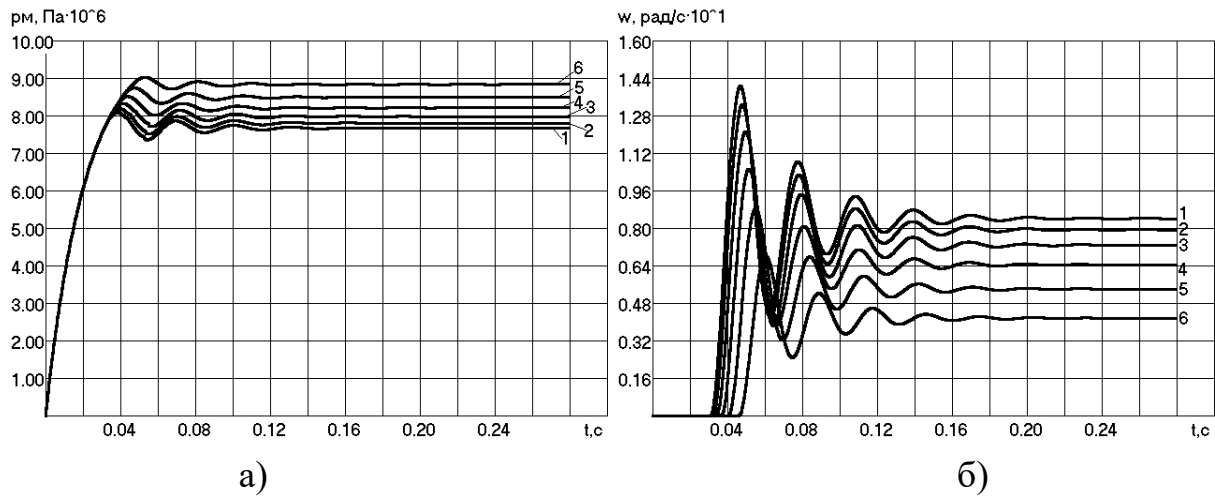


Рисунок 3 – Перехідні процеси в приводі зневоднення ТПВ під час пуску:
а) тиску на вході гідромотора; б) кутової швидкості шнека

Номінальні значення тисків на вході гідромотора, кутової швидкості та частоти обертання шнека для різних величин його зносу наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Номінальні значення тисків на вході гідромотора, кутової швидкості та частоти обертання шнека для різних величин його зносу

u , мкм	0	150	300	450	600	750
p_m , МПа	7,763	7,794	7,972	8,202	8,485	8,825
ω , рад/с	8,396	7,919	7,267	6,430	5,394	4,150
n , об/хв	52,75	49,69	45,66	40,40	33,89	26,08

У результаті проведення регресійного аналізу даних таблиці 2 методом найменших квадратів [15] за допомогою розробленої комп'ютерної програми «RegAnaliz» [16], яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір, і детально описана в роботі [17], визначено степеневі закономірності зміни номінальних значень тисків на вході гідромотора, кутової швидкості та частоти обертання шнека від величини його зносу [8]:

$$p_m = 7,745 + 1,4 \cdot 10^{-5} u^{1,7} \text{ [МПа];} \quad (10)$$

$$\omega = 8,348 - 2,033 \cdot 10^{-4} u^{1,5} \text{ [рад/с];} \quad (11)$$

$$n = 52,43 - 1,276 \cdot 10^{-3} u^{1,5} \text{ [об/хв].} \quad (12)$$

При цьому коефіцієнт кореляції склав 0,99955; 0,99968; 0,99968, відповідно, що свідчить про достатню збіжність одержаних результатів.

На рис. 4 показано графічні залежності номінальних значень тисків на вході гідромотора, кутової швидкості та частоти обертання шнека від величини його зносу, побудовані за допомогою залежностей (10 – 12), що підтверджують достатню збіжність отриманих закономірностей порівняно із даними, наведеними в табл. 2.

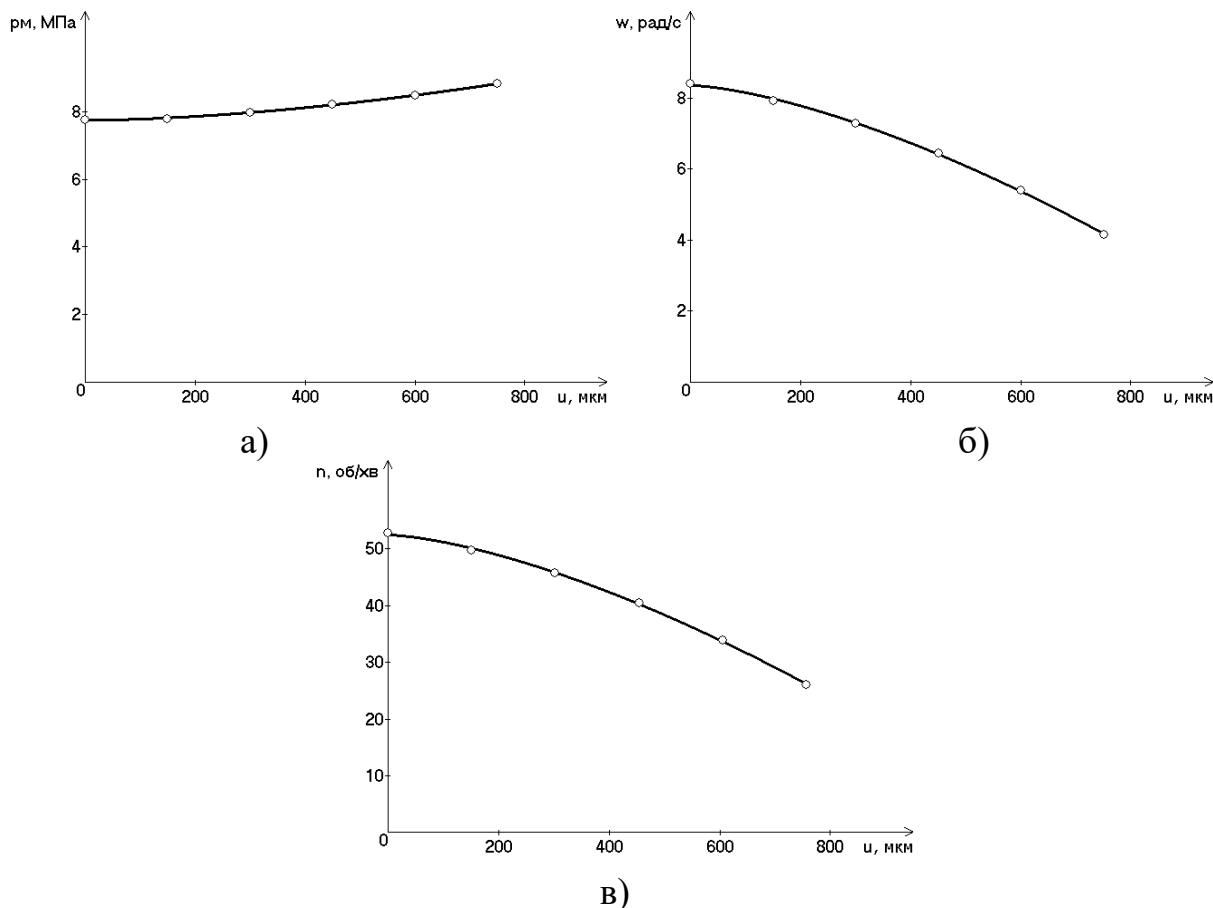


Рисунок 4 – Залежності номінальних значень тисків на вході гідромотора (а), кутової швидкості (б) та частоти обертання (в) шнека від величин його зносу: фактична \circ , теоретична —

Закономірність (12) описує відлагодження від оптимальної частоти обертання шнека в процесі його зношування і використана для визначення енергоємності зневоднення ГПВ із урахуванням зносу шнека [8]

$$\begin{aligned}
 \epsilon = & 1504 - 15,92 w_0 + 0,3214 \rho_0 - 1,069 n(u) - 2061(\Delta_{ш} + u)/(D_{\min} - 2u) - \\
 & - 1947(d_{\min} - 2u)/(D_{\min} - 2u) + 9,118 \cdot 10^{-4} w_0 \rho_0 + 0,002142 w_0 n(u) + \\
 & + 18,12 w_0 (\Delta_{ш} + u)/(D_{\min} - 2u) - 2,115 w_0 (d_{\min} - 2u)/(D_{\min} - 2u) + 4,392 \times \\
 & \times 10^{-4} \rho_0 n(u) - 2,005 \rho_0 (\Delta_{ш} + u)/(D_{\min} - 2u) + 0,3361 \rho_0 (d_{\min} - 2u) \div \\
 & \div (D_{\min} - 2u) + 0,09031 w_0^2 - 7,923 \cdot 10^{-4} \rho_0^2 + 0,008241 n(u)^2 + 104172 \times \\
 & \times [(\Delta_{ш} + u)/(D_{\min} - 2u)]^2 + 1318 [(d_{\min} - 2u)/(D_{\min} - 2u)]^2 \quad [\text{кВт} \cdot \text{год/т}] \quad (13)
 \end{aligned}$$

На рис. 5 представлена графічна залежність зростання енергоємності зневоднення ТПВ внаслідок зношування шнека.

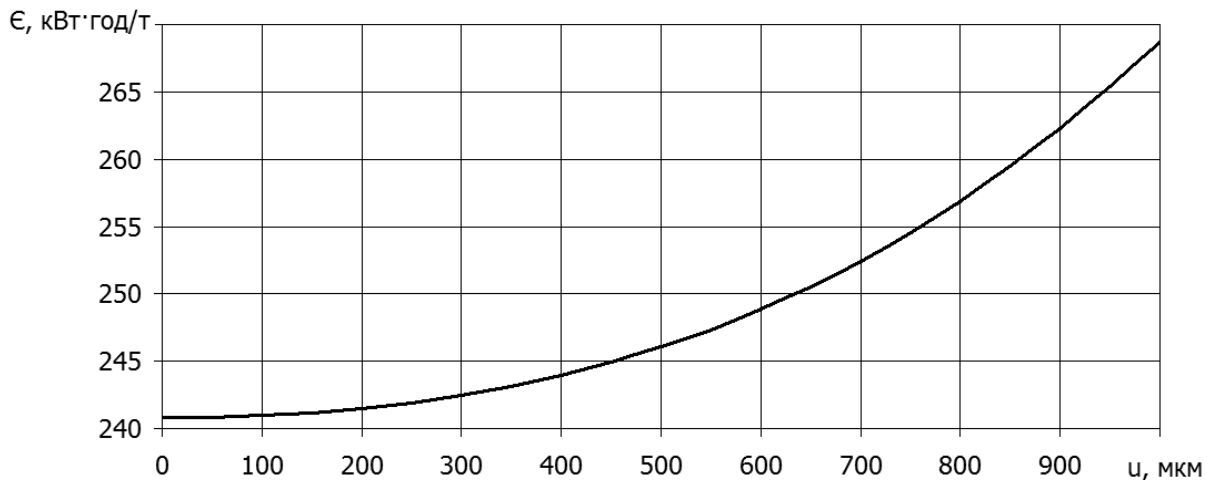


Рисунок 5 – Зростання енергоємності зневоднення ТПВ внаслідок зношування шнека

З рис. 5 видно, що знос шнека на 1000 мкм призводить до зростання енергоємності зневоднення ТПВ на 11,6%, а, отже, і до подорожчання процесу зневоднення ТПВ у сміттевозі. Крім того, це призводить також до значного додаткового виділення тепла в зоні пресування. Це тепло переважно концентрується на кінці робочої зони пресування. Наслідком є плавлення та коксування компонентів ТПВ, що перетворює їх у абразивні частинки. Паралельно в матеріалі шнека під впливом значних температур і означених факторів відбуваються фазові перетворення, розвивається катастрофічне зношування та підвищується ймовірність аварій.

3 Визначення необхідної твердості поверхні шнека за величиною обмеження його зносу

Значення зносу шнека для різних значень твердості його поверхні та шляху тертя наведені в табл. 3 [7].

У результаті проведення регресійного аналізу даних табл. 3 визначено логарифмічні закономірності зносу шнека залежно від твердості його поверхні для різних значень шляху тертя [14]:

$$u_{s=3000} = 334 - 34,07 \ln HB; \quad (14)$$

$$u_{s=6000} = 676,6 - 69,69 \ln HB; \quad (15)$$

$$u_{s=9000} = 999,8 - 103 \ln HB; \quad (16)$$

$$u_{s=12000} = 1295 - 132,7 \ln HB, \quad (17)$$

де u – знос, мкм;

HV – твердість поверхні шнека за Бринелем, МПа;
 s – шлях тертя, м.

Таблиця 3 – Значення зносу шнека для різних значень твердості його поверхні та шляху тертя [7]

№	Марка сталі та її термообробка	Твердість поверхні, МПа	Знос, мкм для шляху тертя, м			
			3000	6000	9000	12000
1	сталь 20 без обробки	2310	68	132	195	258
2	сталь 45 гартування	5180	53	103	153	203
3	сталь У8 гартування	6500	48	91	134	177
4	сталь ШХ15 гартування	6510	43	80	116	152
5	сталь Х12 гартування	6700	39	72	105	138
6	сталь 38ХМЮА іонне азотування	10050	25	43	63	88
7	сталь 45 іонне азотування	5450	26	47	70	98
8	сталь ШХ15 іонне азотування	7860	24	43	64	90
9	сталь Х12 іонне азотування	8600	22	39	58	82
10	сталь 20 цементация	6950	28	52	78	108
11	сталь Х12 нітрогартування	8100	15	25	38	55

На рис. 6 показано графічні залежності зносу шнека залежно від твердості його поверхні для різних значень шляху тертя, побудовані за допомогою залежностей (14 – 17), що підтверджують достатню збіжність отриманих закономірностей порівняно із даними, наведеними в таблиці 3.

Закономірності (14 – 17) для різних значень шляху тертя можуть бути записані в загальному вигляді так:

$$u = A(s) - B(s) \ln HV, \quad (18)$$

де $A(s)$, $B(s)$ – коефіцієнти регресії, які залежать від шляху тертя.

Після проведення додаткового регресійного аналізу коефіцієнти регресії, які залежать від шляху тертя, можуть бути описані степеневими закономірностями:

$$A(s) = 0,5796s^{0,83} - 112,8; \quad (19)$$

$$B(s) = 0,08049s^{0,8} - 14,71. \quad (20)$$

Результати регресійного аналізу наведені в табл. 4, де сірим кольором позначено комірки з максимальними значеннями коефіцієнта кореляції R для кожної із парних регресій.

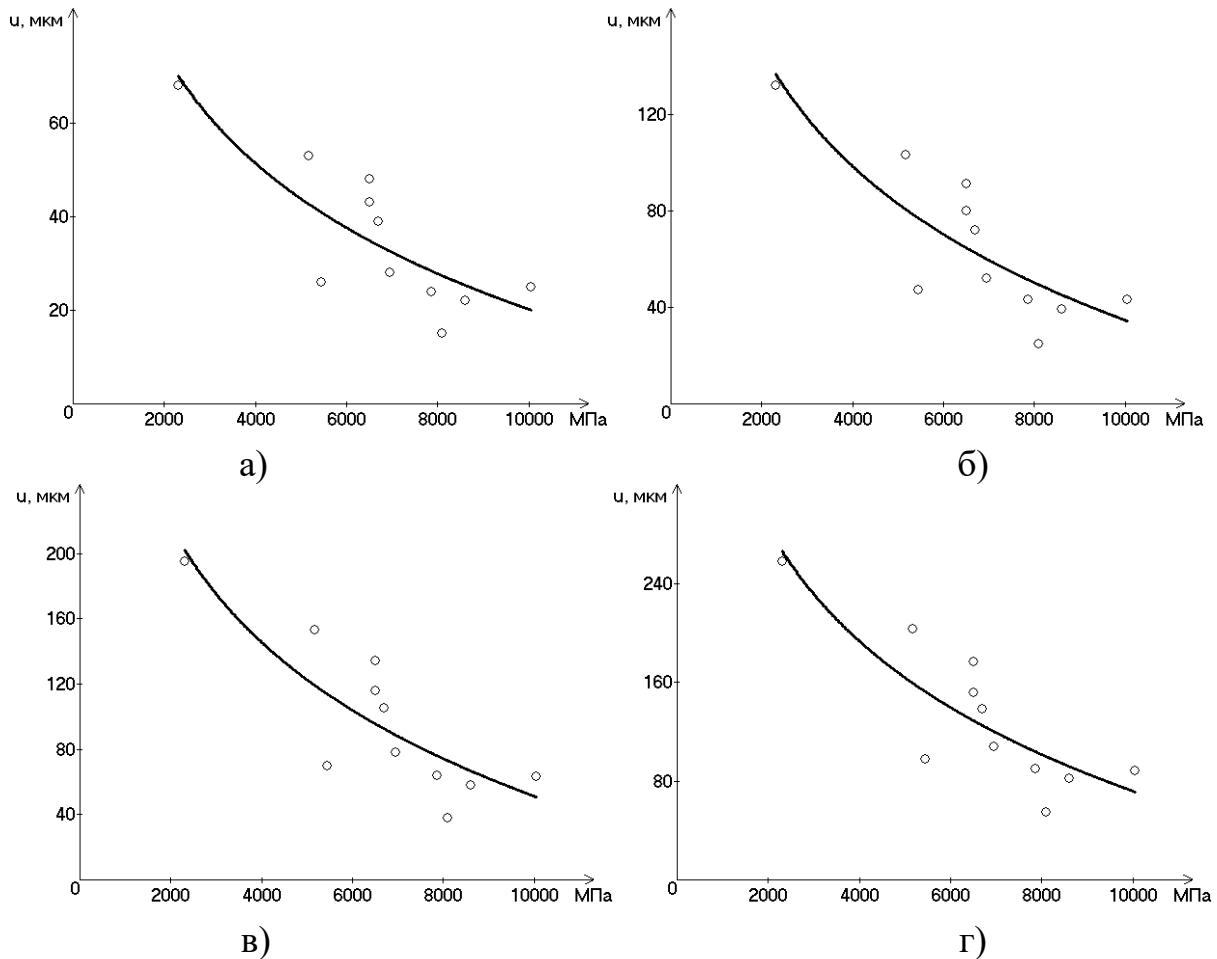


Рисунок 6 – Знос шнека залежно від твердості його поверхні для різних значень шляху тертя (а) – $s = 3000$ м, (б) – $s = 6000$ м, (в) – $s = 9000$ м, (г) – $s = 12000$ м: фактичні \circ , теоретичні —

Таблиця 4 – Результати регресійного аналізу залежності зносу шнека залежно від твердості його поверхні для різних значень шляху тертя

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R для парних регресій					
		$u_{s=3000}=f(HB)$	$u_{s=6000}=f(HB)$	$u_{s=9000}=f(HB)$	$u_{s=12000}=f(HB)$	$A=f(s)$	$B=f(s)$
1	$y = a + bx$	0,81439	0,82376	0,82898	0,83452	0,99945	0,99918
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,66421	0,65974	0,67435	0,68887	0,92263	0,92049
3	$y = a + b / x$	0,78654	0,79114	0,79630	0,80646	0,93981	0,94199
4	$y = x / (a + bx)$	0,81920	0,80115	0,81299	0,82996	0,75583	0,59710
5	$y = ab^x$	0,75553	0,76285	0,77229	0,78180	0,97494	0,97347
6	$y = ae^{bx}$	0,75553	0,76285	0,77229	0,78180	0,97494	0,97347
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,75553	0,76285	0,77229	0,78180	0,97494	0,97347
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,66421	0,65974	0,67435	0,68887	0,92263	0,92049
9	$y = ax^b$	0,73813	0,74002	0,74896	0,76165	0,99969	0,99950
10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,82369	0,83066	0,83603	0,84439	0,98598	0,98706
11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,82370	0,83067	0,83604	0,84440	0,98598	0,98706
12	$y = a / (b + x)$	0,66421	0,65974	0,67435	0,68887	0,92263	0,92049
13	$y = ax / (b + x)$	0,56134	0,54627	0,55756	0,57539	0,99987	0,99976
14	$y = ae^{b/x}$	0,68071	0,67801	0,68615	0,70077	0,98768	0,98864
15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,68071	0,67801	0,68615	0,70077	0,98768	0,98864
16	$y = a + bx^n$	0,75806	0,76923	0,77404	0,77662	0,99998	0,99996

На рис. 7 показано графічні залежності коефіцієнтів регресії від шляху тертя, побудовані за допомогою залежностей (19, 20), що підтверджують достатню збіжність отриманих закономірностей.

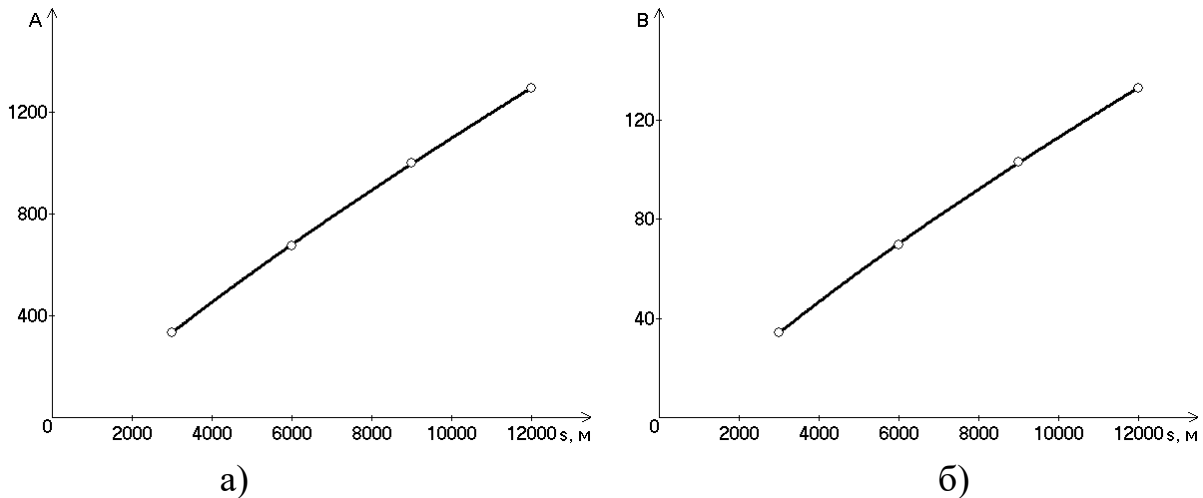


Рисунок 7 – Залежності коефіцієнтів регресії від шляху тертя
(а) – $A = f(s)$, (б) – $B = f(s)$: фактичні \circ , теоретичні —

Після підстановки закономірностей (19, 20) в залежність (18), отримуємо закономірність зносу шнека залежно від твердості його поверхні та шляху тертя [14]:

$$u = 0,5796s^{0,83} - 112,8 - (0,08049s^{0,8} - 14,71)\ln HB. \quad (21)$$

На рис. 8 показано графічну залежність зносу шнека в площині параметрів впливу: твердості його поверхні HB та шляху тертя s .

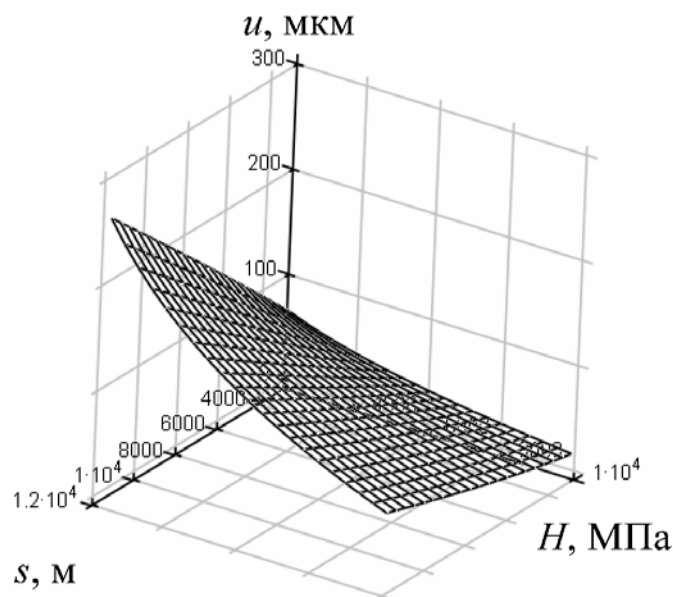


Рисунок 8 – Залежність зносу шнека u в площині параметрів впливу: твердості його поверхні HB та шляху тертя s

Із закономірності (21) можна виразити залежність для визначення необхідної твердості поверхні шнека за величиною його зносу

$$HB = e^{\frac{u-0,5796s^{0,83}+112,8}{14,71-0,08049s^{0,8}}} \text{ [МПа]}. \quad (22)$$

4 Приклад виконання практичних занять

Вихідні данні: марка матеріалу шнека – сталь 45; $n = 52,43$ об/хв; $t_u = 855,6$ с; $K_u = 290$; $n_k = 28$; $w_0 = 46$ %; $\rho_0 = 230$ кг/м³; $\Delta_{ш} = 0,7193$ мм; $d_{min} = 66$ мм; $D_{min} = 89$ мм.

1. Для марки матеріалу шнека – сталь 45 з табл. 1 визначаємо її хімічний склад: $C_C = 0,45$ %, $C_{Cr} = 0,25$ %, $C_{Mn} = 0,65$ %.

2. Визначаємо середній діаметр шнека на останньому витку:

$$d_{CP} = \frac{D_{min} + d_{min}}{2} = \frac{89 + 66}{2} = 77,5 \text{ (мм)} = 0,0775 \text{ (м)}.$$

3. За формулою (3) визначаємо шлях тертя для поверхні шнека зневоднення:

$$s = \frac{3,14 \cdot 0,0775 \cdot 52,43 \cdot 855,6 \cdot 290 \cdot 28}{26 \cdot 60} = 56850 \text{ (м)}.$$

4. За закономірністю (2) розраховуємо знос шнека залежно від хімічного складу його матеріалу та шляху тертя:

$$\begin{aligned} u = & 95 - 7,467 \cdot 0,45 - 72,39 \cdot 0,25 - 1782 \cdot 0,65 + 0,0344 \cdot 56850 - \\ & - 0,02148 \cdot 0,45 \cdot 56850 + 0,00214 \cdot 0,25 \cdot 56850 - 0,01323 \cdot 0,65 \cdot 56850 + \\ & + 352,5 \cdot 0,45^2 - 3,065 \cdot 0,25^2 + 2405 \cdot 0,65^2 = 950,5 \text{ (мкм)}. \end{aligned}$$

5. За закономірностями (10-12) визначаємо параметри процесу зневоднення:

$$\begin{aligned} p_M &= 7,745 + 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 950,5^{1,7} = 9,36 \text{ (МПа)}; \\ \omega &= 8,348 - 2,033 \cdot 10^{-4} \cdot 950,5^{1,5} = 2,39 \text{ (рад/с)}; \\ n &= 52,43 - 1,276 \cdot 10^{-3} \cdot 950,5^{1,5} = 15 \text{ (об/хв)}. \end{aligned}$$

6. Визначимо енергоємність зневоднення із урахуванням зносу шнека за залежністю (13):

$$\begin{aligned}
\epsilon = & 1504 - 15,92 \cdot 46 + 0,3214 \cdot 230 - 1,069 \cdot 15 - 2061(0,7193 + 0,9505)/(89 - \\
& - 2 \cdot 0,9505) - 1947(66 - 2 \cdot 0,9505)/(89 - 2 \cdot 0,9505) + 9,118 \cdot 10^{-4} \cdot 46 \cdot 230 + \\
& + 0,002142 \cdot 46 \cdot 15 + 18,12 \cdot 46(0,7193 + 0,9505)/(89 - 2 \cdot 0,9505) - 2,115 \times \\
& \times 46(66 - 2 \cdot 0,9505)/(89 - 2 \cdot 0,9505) + 4,392 \cdot 10^{-4} \cdot 230 \cdot 15 - 2,005 \cdot 230 \times \\
& \times (0,7193 + 0,9505)/(89 - 2 \cdot 0,9505) + 0,3361 \cdot 230(66 - 2 \cdot 0,9505) \div \\
& \div (89 - 2 \cdot 0,9505) + 0,09031 \cdot 46^2 - 7,923 \cdot 10^{-4} \cdot 230^2 + 0,008241 \cdot 15^2 + \\
& + 104172 [(0,7193 + 0,9505)/(89 - 2 \cdot 0,9505)]^2 + 1318 [(66 - 2 \cdot 0,9505) \div \\
& \div (89 - 2 \cdot 0,9505)]^2 = 265,4 \text{ (кВт} \cdot \text{год/т)}.
\end{aligned}$$

7. За залежністю (22) визначимо необхідну твердість поверхні шнека за величиною його зносу:

$$HB = e^{\frac{950,5 - 0,5796 \cdot 56850^{0,83} + 112,8}{14,71 - 0,08049 \cdot 56850^{0,8}}} = 3496 \text{ (МПа)}.$$

8. За отриманим значенням твердості поверхні шнека і його маркою матеріалу – сталь 45 за допомогою табл. 3 визначаємо вид термообробки – гартування, який забезпечить твердість поверхні 5180 МПа.

Контрольні запитання

1. Вміст яких елементів матеріалу шнека впливає на його знос?
2. Вміст якого елемента матеріалу шнека найбільше впливає на його знос?
3. Вміст якого елемента матеріалу шнека найменше впливає на його знос?
4. Як впливає знос шнека на тиску на вході гідромотора?
5. Як впливає знос шнека на його кутову швидкість?
6. Як впливає знос шнека на його частоту обертання?
7. Як впливає знос шнека на енергоємність зневоднення ТПВ?
8. Як впливає твердість поверхні шнека на його знос?

Список використаної літератури

1. Дворук В. І., Борак К. В., Добранський С. С. Вплив легування хромом конструкційної сталі на її абразивну зносостійкість після термічної обробки // Проблеми трибології. 2014. № 2. С. 24-28.
2. Цимбал Б. М. Підвищення зносостійкості шнекових екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах : автореф. дис. канд. техн. Наук. Харків, 2017. 21 с.
3. Дубовий О. М. Підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей електродугових та плазмових покриттів формуванням термічно стабільної здрібненої і нанорозмірної субструктури / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, М. М. Бобров, О. В. Лабарткава, Ю. Є. Неделько, О. О. Лимар // *Metallophysics & Advanced Technologies*. 2019. № 41(4). С. 461-480. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.04.0461>
4. Bereziuk O. V., Savulyak V. I., Kharzhevskiy V. O. Dynamics of wear and tear of garbage trucks in Khmelnytskyi region // *Problems of Tribology*. 2022. No. 27(3/105). P. 70-75. URL : <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-70-75>
5. Карпеченко А. А., Бобров М. М. Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості функціональних електродугових композиційних покриттів // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 2. С. 94-100. URL : <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-94-100>
6. Bereziuk O. V. Research of the impact of carbon content in the auger material on its wear during dehydration in the solid waste garbage truck through regression analysis / O. V. Bereziuk, V. I. Savulyak, V. O. Kharzhevskiy, A. A. Osadchuk // *Problems of Tribology*. 2021. No 26(4/102). P. 12-19. URL : <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-102-4-12-19>
7. Каплун В. Г., Гончар В. А., Матвіїшин П. В. Підвищення зносостійкості шнека і циліндра екструдера при виготовленні комбікормів для тварин з домішками мінералу сапоніту // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2013. № 5. С. 7-11.
8. Bereziuk O. V., Savulyak V. I., Kharzhevskiy V. O. The influence of auger wear on the parameters of the dehydration process of solid waste in the garbage truck // *Problems of Tribology*. 2021. No 26(2/100). P. 79-86. URL : <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-79-86>
9. Bereziuk O. V., Savulyak V. I., Kharzhevskiy V. O. The influence of the alloying of the auger by the chromium on its wear during dehydration process of municipal solid waste in the garbage truck // *Problems of Tribology*. 2022. No 27(1/103). P. 50-57. URL : <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-50-57>
10. Andersson O. *Experiment!: planning, implementing and interpreting* John Wiley & Sons, 2012. 288 p.

11. Березюк О. В. Комп'ютерна програма «Планування експерименту» («PlanExp») // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №46876. Київ : Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації: 21.12.2012.

12. Березюк О. В. Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми «PlanExp» // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Вінниця. 2016. № 6. С. 23-28.

13. . Bereziuk O. V., Savulyak V. I., Kharzhevskiy V. O. The influence of the chemical composition of the hardened auger on its wear during dehydration process of municipal solid waste in the garbage truck // Problems of Tribology. 2022. No 27(2/104). P. 64-70. URL : <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-104-2-64-70>

14. . Bereziuk O. V., Savulyak V. I., Kharzhevskiy V. O. Regression analysis of the influence of augersurface hardness on its wear during dehydration of solid waste in a garbage truck // Problems of Tribology. 2021. No 26(3/101). P. 48-55. URL : <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-101-3-48-55>

15. Михалевич В. М., Шевчук О. І., Буга Н. Л. Математичні системи комп'ютерної алгебри як засіб підвищення ефективності і якості освітнього процесу з вищої математики : зб. наук. праць // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. / редкол. : І. А. Зязюн (голова) та ін. Київ-Вінниця : ДОВ «Вінниця», 2007. Випуск 14. С. 357-360.

16. Березюк О. В. Комп'ютерна програма «Регресійний аналіз» («RegAnaliz») // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. Київ : Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації : 03.06.2013.

17. Березюк О. В. Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми «RegAnaliz» // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2014. № 1. С. 40-45.

18. Моїсеєнко Л. Л. Матеріалознавство та технологія матеріалів: навчально-методичний посібник для студентів заочної форми навчання морських закладів освіти за напрямками: 6.070104 «Морський та річковий транспорт», 6.050702 «Електромеханіка». Херсон : ХДМІ, Айлант, 2011. 84 с.

19. ДСТУ 7809:2015. Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 31 с.

20. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Металознавство та теорія термічної обробки» для студентів за

напрямом підготовки 6.050401 «Металургія» / уклад. Н. М. Козіна. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2013. 14 с.

21. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Матеріалознавство» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 132 Матеріалознавство / уклад.: О. Б. Лисенко, Т. В. Калініна. Кам'янське : ДДТУ, 2019. 70 с.

22. Опальчук А. С., Котречко О. О., Роговський Л. Л. Лабораторний практикум з технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства: навчальний посібник. Київ : Вища освіта, 2006. 287 с.

23. Методичні вказівки з дисципліни «Матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму з розділу «Механічні властивості матеріалів» для студентів усіх форм навчання / уклад.: В. В. Трофименко, О. П. Клименко, В. І. Овчаренко. Дніпропетровськ : УДХТУ, 2012. 38 с.

24. Жигуц Ю. Ю., Лазар В. Ф., Талабірчук В. Ю. Термітні швидкорізальні сталі // Прогресивні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць III-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2-6 лютого 2015 р. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2015. С. 50-52.

25. Руденко Л. Ф., Говорун Т. П. Леговані сталі та сплави : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2012. 171 с.

26. Методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму з розділу «Вивчення структури, властивостей та призначення конструкційних легованих сталей, частина I» для студентів усіх форм навчання / уклад. : В. В. Трофименко, В. І. Овчаренко. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2015. 31 с.

27. Вплив хімічного складу і температури на фазовий стан залізовуглецевих сплавів [Текст]: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму з розділу для студентів усіх форм навчання / уклад. : В. В. Трофименко, О. П. Клименко, В. І. Овчаренко. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2014. 46 с.

28. Куцова В. З., Ковзель М. А., Носко О. А. Фазові перетворення в спеціальних легованих сталях : навчальний посібник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2007. 132 с.

29. Сігова В. І., Юскаєв В. Б., Будник А. Ф. Технологія і проектне рішення термічних цехів і дільниць : навч. посіб. Суми : Вид-во СумДУ, 2010. 318 с.

ДОДАТОК А

Варіанти завдань

Таблиця А.1 – Варіанти завдань

Варіант	Марка сталі	d_{min} , мм	D_{min} , мм	n_{onm} , об/хв	$t_{ц}$, с	$K_{ц}$, шт	$n_{к}$, шт	w_0 , %	ρ_0 , кг/м ³	$\Delta_{ш}$, мм
1	У8	65	90	50	850	300	30	50	250	0,70
2	ШХ15	64	89	49	840	295	29	49	245	0,69
3	10	58	83	43	780	268	12	43	215	0,63
4	X12	63	88	48	830	290	28	48	240	0,68
5	20	62	87	47	820	185	14	47	235	0,67
6	38ХМЮА	61	86	46	810	280	14	46	230	0,66
7	08	59	84	44	790	270	11	44	220	0,64
8	У7	49	74	34	690	220	26	34	170	0,54
9	15	57	82	42	770	260	14	42	210	0,62
10	У9	48	73	33	780	715	35	33	165	0,53
11	25	56	81	41	760	135	10	41	205	0,61
12	У10	47	72	32	670	710	40	32	160	0,52
13	35	54	79	39	740	245	19	39	195	0,59
14	20ХГНР	60	85	45	800	275	25	45	225	0,65
15	40	53	78	38	730	240	18	38	190	0,58
16	У12	46	71	31	660	565	37	31	155	0,51
17	50	52	77	37	720	235	17	37	185	0,57
18	У13	45	70	30	650	540	38	30	150	0,50
19	55	51	76	36	710	170	10	36	180	0,56
20	18ХГТ	44	69	29	410	595	39	29	145	0,49
21	60	50	75	35	700	225	15	35	175	0,55
22	45	66	91	51	855	305	31	51	255	0,71

ДОДАТОК Б

Хімічний склад сталей та сплавів

Таблиця Б.1 – Хімічний склад вуглецевої сталі звичайної якості групи Б [18]

Марка сталі	C, %	Mn,%	Si, %	P,%	S, %
Ст. 0	≤ 0,23	–	–	0,07	0,06
Ст. 1	0,06...0,12	0,25...0,50	0,05...0,17	0,04	0,05
Ст. 2	0,09...0,15	0,25...0,50	0,05...0,17	0,04	0,05
Ст. 3кп	0,14...0,22	0,40...0,65	≤ 0,07	0,04	0,05
Ст. 4	0,18...0,27	0,40...0,70	0,05...0,17	0,04	0,05
Ст. 5	0,28...0,37	0,50...0,80	0,05...0,17	0,04	0,05
Ст. 6сп	0,38...0,49	0,50...0,80	0,15...0,35	0,04	0,05
Ст. 7пс	0,50...0,62	0,50...0,80	0,15...0,35	0,04	0,05

Примітка. Масова частка хрому, нікелю та міді у сталі повинна бути не більше 0,30% кожного.

Таблиця Б.2 – Хімічний склад якісної вуглецевої конструкційної сталі [18, 19]

Марка сталі	C, %	Mn,%	Si, %	Cr, %
08пс	0,05...0,11	0,35...0,65	0,05...0,17	0,10
10пс	0,07...0,14	0,35...0,65	0,05...0,17	0,15
15	0,12...0,19	0,35...0,65	0,17...0,37	0,25
20	0,17...0,24	0,35...0,65	0,17...0,37	0,25
25	0,22...0,30	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
30	0,27...0,35	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
35	0,32...0,40	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
40	0,37...0,45	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
45	0,42...0,50	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
50	0,47...0,55	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
55	0,52...0,60	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
60	0,57...0,65	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
65	0,62...0,70	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
70	0,67...0,75	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
75	0,72...0,80	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
80	0,77...0,85	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
85	0,82...0,90	0,50...0,80	0,17...0,37	0,25
60Г	0,57...0,65	0,70...1,00	0,17...0,37	0,25
65Г	0,62...0,70	0,90...1,20	0,17...0,37	0,25
70Г	0,67...0,75	0,90...1,20	0,17...0,37	0,25

Таблиця Б.3 – Хімічний склад низьколегованої конструкційної сталі [18]

Марка сталі	Вміст елементів, % (решта – залізо)					
	C, %	Si, %	Mn, %	Cr	Ni	Cu
				не більше		
14Г	0,12...0,18	0,17...0,37	0,70...1,00	0,30	0,30	0,30
19Г	0,16...0,22	0,17...0,37	0,80...1,15	0,30	0,30	0,30
09Г2	≤ 0,12	0,17...0,37	1,40...1,80	0,30	0,30	0,30
14Г2	0,12...0,18	0,17...0,37	1,20...1,60	0,30	0,30	0,30
18Г2	0,14...0,20	0,25...0,55	1,20...1,60	0,30	0,30	0,30
12ГС	0,09...0,15	0,50...0,80	0,80...1,20	0,30	0,30	0,30
16ГС	≤ 0,12	0,40...0,70	0,90...1,20	0,30	0,30	0,30
17ГС	0,14...0,20	0,40...0,60	1,00...1,40	0,30	0,30	0,30
09Г2С	≤ 0,12	0,50...0,80	1,30...1,70	0,30	0,30	0,30
10Г2С1	≤ 0,12	0,90...1,20	1,30...1,65	0,30	0,30	0,30
15ГФ	0,12...0,18	0,17...0,37	0,90...1,20	0,30	0,30	Ванадій: 0,05...0,1
14ХГС	0,11...0,16	0,40...0,70	0,90...1,30	0,50...0,80	0,30	0,30
15ХСНД	0,12...0,18	0,40...0,70	0,40...0,70	0,60...0,90	0,30...0,60	0,20...0,40
10ХСНД	≤ 0,12	0,80...1,10	0,50...0,80	0,60...0,90	0,50...0,80	0,40...0,65

Примітка. В позначенні марок сталі двозначні числа вказують приблизний вміст вуглецю у сотих долях відсотку. Літери справа від цифр означають хімічний компонент сталі (Г – марганець, С – кремній, Х – хром, Н – нікель, Д – мідь, Ф – ванадій). Цифри після букв означають вміст відповідного елементу у відсотках. Якщо вміст легуючого елемента менше 1,5 %, то цифри після букви не ставляться.

Таблиця Б.4 – Хімічний склад легованої конструкційної сталі [18]

Група сталі	Марка сталі	Вміст елементів, % (решта – залізо)				
		C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	інші леговані елементи, %
Хромиста	15ХА	0,12...0,17	0,17...0,37	0,40...0,70	0,70...1,00	–
	30Х	0,24...0,32	0,17...0,37	0,50...0,80	0,80...1,10	–
	35Х	0,31...0,39	0,17...0,37	0,50...0,80	0,80...1,10	–
	45Х	0,41...0,49	0,17...0,37	0,50...0,80	0,50...0,80	–
Марганцевиста	15Г	0,12...0,19	0,17...0,37	0,70...1,00	–	–
	30Г	0,27...0,35	0,17...0,37	0,70...1,00	–	–
	45Г	0,42...0,50	0,17...0,37	0,70...1,00	–	–
	30Г2	0,26...0,35	0,17...0,37	1,40...1,80	–	–
Хромомарганцева	18ХГ	0,15...0,21	0,17...0,37	0,90...1,20	0,90...1,20	–
	18ХГТ	0,17...0,23	0,17...0,37	0,80...1,10	1,00...1,30	Ti (0,03...0,09)
	35ХГФ	0,31...0,38	0,17...0,37	0,95...1,25	1,00...1,30	Ti (0,03...0,09) V (0,06...0,12)
Хромокременіста	33ХС	0,29...0,37	1,00...1,40	0,30...0,60	1,30...1,60	–
	40ХС	0,37...0,45	1,00...1,40	0,30...0,60	1,30...1,60	–
Хромованадієва	15ХФ	0,12...0,18	0,17...0,37	0,40...0,70	0,80...1,10	V (0,06...0,12)
	45ХН	0,41...0,49	0,17...0,37	0,50...0,80	0,45...0,75	Ni (1,00...1,40)
Хромомарганцевонікелева	20ХГНР	0,16...0,23	0,17...0,37	0,70...1,00	0,70...1,00	Ni (0,80...1,10) B ≤ 0,005
	38ХГН	0,35...0,43	0,17...0,37	0,80...1,10	0,50...0,80	Ni (0,70...1,00)
Хромомолібденова	15ХМ	0,11...0,18	0,17...0,37	0,40...0,70	0,80...1,10	Mo (0,40...0,55)
	30ХМА	0,26...0,33	0,17...0,37	0,40...0,70	0,80...1,10	Mo (0,15...0,25)
Хромокременістомарганцева	20ХГСА	0,17...0,23	0,90...1,20	0,80...1,10	0,80...1,10	–
	30ХГС	0,28...0,35	0,90...1,20	0,80...1,10	0,80...1,10	–
Хромонікельмолібденова	20ХН2М	0,15...0,22	0,17...0,37	0,40...0,70	0,40...0,60	Ni (2,75...3,15) Mo (0,20...0,30)
	38ХН3МА	0,33...0,40	0,17...0,37	0,25...0,50	0,80...1,20	Ni (2,75...3,15) Mo (0,20...0,30)
Хромонікельванадієва	20ХН4ФА	0,17...0,24	0,17...0,37	0,25...0,55	0,70...1,10	Ni (3,75...4,15)
	45ХН2МФ	0,42...0,50	0,17...0,37	0,50...0,80	0,80...1,10	Ni (1,30...1,80) Mo (0,20...0,30)
Хромоалюмінієва	38Х2Ю	0,35...0,43	0,20...0,40	0,20...0,50	1,50...1,50	Al (0,50...0,80)
Хромоалюмінієва з молібденом	38ХМЮА 38Х2МЮ	0,35...0,42	0,20...0,45	0,30...0,60	1,35...1,65	Mo (0,15...0,25) Al (0,70...1,10)

Таблиця Б.5 – Хімічний склад вуглецевих інструментальних сталей [20]

Марки сталі	Вміст елементів, %			
	вуглецю	марганцю	хрому	кремнію
У7	0,65...0,74	0,20...0,4	до 0,15	0,30...0,35
У8	0,75...0,84	0,15...0,4	« 0,15	0,30...0,35
У9	0,85...0,94	0,15...0,35	« 0,15	0,30...0,35
У10	0,95...1,04	0,15...0,35	« 0,15	0,30...0,35
У11	1,05...1,14	0,15...0,35	« 0,15	0,30...0,35
У12	1,15...1,24	0,15...0,35	« 0,15	0,30...0,35
У13	1,25...1,35	0,15...0,35	« 0,15	0,30...0,35

Примітка. Літера У означає, що сталь вуглецева, а цифра при ній вказує на середній вміст вуглецю в сталі в десятих долях процента.

Таблиця Б.6 – Хімічний склад легованих сталей для різального інструменту [29]

Марка сталі	Вміст основних елементів, %					
	С	Si	Mn	Cr	W	V
9ХФ	0,80...0,90	0,15...0,35	0,30...0,6	0,40...0,70	–	0,15...0,30
11ХФ	1,05...1,15	0,15...0,35	0,40...0,7	0,40...0,70	–	0,15...0,30
13Х	1,25...1,40	0,15...0,35	0,30...0,6	0,40...0,70	–	–
ХВ4	1,25...1,45	0,15...0,35	0,15...0,4	0,40...0,70	3,5...4,3	0,15...0,30
В2Ф	1,05...1,20	0,15...0,35	0,20...0,5	0,20...0,40	1,6...2,0	0,20...0,30
9Х1	0,80...0,95	0,25...0,45	0,15...0,4	1,40...1,70	–	–
12Х1	1,15...1,25	0,15...0,35	0,30...0,6	1,30...1,65	–	–
Х	0,95...1,10	0,15...0,35	0,15...0,4	1,30...1,65	–	–
9ХС	0,85...0,95	1,20...1,60	0,30...0,6	0,95...1,25	–	–
ХГС	0,95...1,05	0,40...0,70	0,85...1,3	1,30...1,65	–	–
9ХВГ	0,85...0,95	0,15...0,35	0,90...1,2	0,50...0,80	0,5...0,8	–
ХВГ	0,90...1,05	0,15...0,35	0,80...1,1	0,90...1,20	1,2...1,6	–
ХВС1	0,95...1,05	0,65...1,00	0,60...0,9	0,60...1,1	0,5...0,8	0,05...0,15
9Х5ВФ	0,85...1,00	0,15...0,40	0,15...0,4	4,5...5,5	0,8...1,2	0,15...0,30
8Х6НВТ	0,80...0,90	0,15...0,35	0,15...0,4	5,0...6,0	0,9...1,3	0,30...0,50
8Х4В3М3Ф2	0,75...0,85	0,15...0,35	0,15...0,4	3,5...4,5	2,5...3,2	1,9...2,5

Таблиця Б.7 – Хімічний склад інструментальної швидкорізальної сталі [18, 20, 29]

Марка сталі	Вміст елементів, % (решта – залізо)							
	C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Co
P18	0,7...0,8	0,4	0,5	3,8...4,4	17,0...18,5	1,0...1,4	≤1,0	–
P12	0,8...0,9	0,4	0,5	3,1...3,6	12,0...13,0	1,5...1,9	≤1,0	–
P9	0,85...0,95	0,4	0,5	3,8...4,4	8,5...10,0	2,0...2,6	≤1,0	–
P6M5	0,80...0,88	0,4	0,5	3,8...4,4	5,5...6,5	1,7...2,1	5,0...5,5	–
P6M3	0,85...0,95	0,4	0,5	3,0...3,5	5,5...6,5	2,0...2,5	3,0...3,6	–
P18Φ2	0,85...0,95	0,4	0,5	3,8...4,4	17,0...18,0	1,8...2,4	≤1,0	–
P14Φ4	1,20...1,30	0,4	0,5	4,0...4,5	13,0...14,5	3,4...4,1	–	–
P12Φ3	0,95...1,05	0,4	0,5	3,8...4,3	12,0...13,0	2,5...3,0	0,5...1,0	–
P9Φ5	1,40...1,50	0,4	0,5	3,8...4,2	9,0...10,5	4,3...5,1	<1,0	–
P6M5Φ3	0,96...1,05	0,4	0,5	3,8...4,3	5,7...6,7	2,2...2,6	5,5...6,0	–
P9K10	0,90...1,00	0,4	0,5	3,8...4,3	9,0...10,5	2,0...2,6	<1,0	9,0...10,5
P9K5	0,90...1,00	0,4	0,5	3,8...4,4	9,0...10,5	2,0...2,6	<1,0	5,0...6,0
P18K5Φ2	0,85...0,95	0,4	0,5	3,8...4,4	17,0...18,5	1,8...2,4	<1,0	5,0...6,0
P10K5Φ5	1,45...1,55	0,4	0,5	4,0...4,6	10,0...11,5	4,3...5,1	<1,0	5,0...6,0
P9M4K8	1,00...1,10	0,4	0,5	3,0...3,6	8,5...9,6	2,1...2,5	3,8...4,3	7,5...8,5
P6M5K5	0,80...0,88	0,4	0,5	3,8...4,3	6,0...7,0	1,7...2,2	4,8...5,8	4,8...5,3
P9K10	0,9...1,0	0,4	0,5	3,8...4,4	9,0...10,5	2,0...2,6	≤1,0	9,0...10,5
B11M7K23	0,1	–	–	–	0,5	11	7	23

Примітка. До складу інструментальної швидкорізальної сталі зазначених марок входять, зокрема, наступні елементи: нікель – не більше 0,4 %, сірка – не більше 0,03 %, фосфор (крім P6M5 та P6M5K5) – не більше 0,03 %, для сталей марок P6M5 та P6M5K5 вміст фосфору – не більше 0,035 %.

Таблиця Б.8 – Хімічний склад кулькопідшипникових сталей [26]

Сталь	Вміст елементів, %			
	C	Mn	Cr	Si
ШХ6	1,05...1,15	0,20...0,40	0,4...0,7	0,17...0,37
ШХ9	1,05...1,10	0,20...0,40	0,9...1,2	0,17...0,37
ШХ15	0,95...1,05	0,20...0,40	1,3...1,65	0,17...0,37
ШХ15СГ	0,95...1,05	0,90...1,20	1,3...1,65	0,40...0,65

Таблиця Б.9 – Хімічний склад пружинно-ресорних сталей [26]

Сталь	Вміст елементів, %			
	C	Mn	Si	Інші елементи
65	0,62...0,70	0,50...0,80	0,17...0,37	–
50C2	0,47...0,55	0,60...0,90	1,50...2,0	–
70C3A	0,66...0,74	0,60...0,90	2,40...2,80	–
55C2	0,53...0,58	0,60...0,90	1,50...2,00	–
60C2	0,57...0,65	0,60...0,90	1,50...2,00	–
60C2A	0,58...0,63	0,60...0,90	1,60...2,00	–
60C2XФА	0,56...0,64	0,40...0,70	1,40...1,80	0,90...1,20 Cr 0,10...0,20 V
65C2BA	0,61...0,69	0,70...1,00	1,50...2,00	0,30 Cr 0,80...1,20 W
50XГА	0,47...0,52	0,80...1,00	–	0,95...1,20 Cr
50XФА	0,46...0,54	0,50...0,80	–	0,80...1,10 Cr 0,10...0,20 V

Таблиця Б.10 – Хімічний склад деяких надтвердих сплавів [28, 29]

Марка сплаву	Склад, %			
	WC	TiC	TaC	Co
Вольфрамові				
ВК3	97	–	–	3
ВК4	96	–	–	4
ВК6	94	–	–	6
ВК8	92	–	–	8
ВК10	90	–	–	10
ВК15	85	–	–	15
ВК20	80	–	–	20
ВК25	75	–	–	25
Титановольфрамові				
T30K4	66	30	–	4
T15K6	79	15	–	6
T14K8	78	14	–	8
T5K10	85	5	–	10
T5K12	83	5	–	12

Продовження таблиці Б.10

Марка сплаву	Склад, %			
	WС	TiС	TaС	Со
Титанотанталовольфрамові				
ТТ7К12	81	4	3	12
ТТ8К6	84	8	2	6
ТТ10К8	82	3	7	8
ТТ20К9	71	8	12	9
Безвольфрамові				
ТН20	–	80	–	(Ni+Mo) – 20
КНТ16	–	84 – Ti(C,N)	–	(Ni+Mo) – 16

ДОДАТОК В
Механічні властивості сталі без термічної обробки

Таблиця В.1 – Переведення одиниць твердості HB, HRA, HRB, HRC, HV, HSh, визначених на різних твердомірах [22]

Твердомір						
Бринелля	Роквелла			Віккерса	Шора	
Індентор						
Сталева кулька $D = 10$ мм	Алмаз- ний ко- нус	Кулька $D = 1/16''$	Алмаз- ний ко- нус	Алмазна піраміда	Стале- вий бо- йок	
Діаметр відбитка, мм	Шкала					
	HB	HRA	HRB	HRC	HV	HSh
2,20	780	89	–	72	1224	99
2,25	745	87	–	70	1116	97
2,30	712	86	–	68	1022	95
2,35	682	85	–	66	941	93
2,40	653	84	–	64	868	88
2,45	627	83	–	62	804	85
2,50	601	82	–	60	746	81
2,55	578	81	–	58	694	78
2,60	555	79	–	56	649	75
2,65	534	78	–	54	606	72
2,70	514	77	–	52	587	70
2,75	495	76	–	50	551	68
2,80	477	76	–	49	534	66
2,85	461	75	–	48	502	64
2,90	444	74	–	46	473	61
2,95	429	73	–	45	460	59
3,00	415	72	–	44	435	57
3,02	409	72	–	43	423	55
3,05	401	71	–	42	412	53
3,10	388	71	–	41	401	52
3,15	375	70	–	40	390	50
3,20	363	70	–	39	380	49
3,25	352	69	–	38	361	47
3,30	341	68	–	37	344	46
3,35	331	68	–	36	335	45
3,40	321	67	–	35	320	44
3,45	311	67	–	34	312	42
3,50	302	67	–	33	305	41
3,55	293	66	–	31	291	40
3,60	286	66	–	30	285	–
3,65	277	65	–	29	278	–

Твердомір						
Бринелля		Роквелла			Віккерса	Шора
Індентор						
Сталева кулька $D = 10$ мм		Алмаз- ний ко- нус	Кулька $D = 1/16''$	Алмаз- ний ко- нус	Алмазна піраміда	Стале- вий бо- йок
Діаметр відбитка, мм	Шкала					
	НВ	НРА	HRB	HRC	HV	HSh
3,70	269	65	–	28	272	–
3,75	262	64	–	27	261	–
3,80	255	64	–	26	255	–
3,85	248	63	–	25	250	–
3,90	241	63	100	24	240	–
3,95	235	62	99	23	235	–
4,00	228	62	98	22	226	–
4,05	223	61	97	21	221	–
4,10	217	61	97	20	217	–
4,15	212	60	96	19	213	–
4,20	207	60	95	18	209	–
4,25	202	59	94	16	201	–
4,30	196	58	93	15	197	–
4,35	192	58	92	15	190	–
4,40	187	57	91	–	186	–
4,45	183	56	89	–	183	–
4,50	179	56	88	–	177	–
4,55	174	55	87	–	174	–
4,60	170	–	86	–	171	–
4,65	166	–	85	–	165	–
4,70	163	–	84	–	162	–
4,75	159	–	83	–	159	–
4,80	156	–	82	–	154	–
4,85	153	–	81	–	152	–
4,90	149	–	80	–	149	–
4,95	146	–	78	–	147	–
5,00	143	–	76	–	144	–
5,05	140	–	76	–	–	–
5,10	137	–	75	–	–	–
5,15	134	–	74	–	–	–
5,20	131	–	72	–	–	–
5,25	128	–	71	–	–	–
5,35	126	–	69	–	–	–
5,30	124	–	69	–	–	–

Твердомір						
Бринелля		Роквелла		Віккерса	Шора	
Індентор						
Сталева кулька $D = 10$ мм		Алмаз- ний ко- нус	Кулька $D = 1/16''$	Алмаз- ний ко- нус	Алмазна піраміда	Стале- вий бо- йок
Діаметр відбитка, мм	Шкала					
	НВ	НРА	НRB	НRC	НV	НSh
5,40	121	–	67	–	–	–
5,45	118	–	66	–	–	–
5,50	116	–	65	–	–	–
5,55	114	–	64	–	–	–
5,60	112	–	62	–	–	–
5,65	109	–	61	–	–	–
5,70	107	–	59	–	–	–
5,75	105	–	58	–	–	–
5,80	103	–	57	–	–	–
5,85	101	–	56	–	–	–
5,90	99	–	54	–	–	–
5,95	97	–	53	–	–	–
6,00	96	–	52	–	–	–
6,10	92	–	49,5	–	–	–
6,20	88	–	47	–	–	–
6,36	84	–	43,5	–	–	–
6,48	80	–	40,5	–	–	–
6,56	78	–	38,5	–	–	–

Таблиця В.2 – Властивості металів і сплавів [18]

Метал	Густина, г/см ³	Твердість НВ, МПа
Сталь маловуглецева	7,8	1300...1700
Сталь середньовуглецева	7,8	1700...2200
Сталь високовуглецева	7,8	2200...2550

Таблиця В.3 – Механічні характеристики окремих марок вуглецевої сталі звичайної якості групи А [18]

Марка сталі	Межа міцності σ_B , МПа	Відносне видовження δ , %	Призначення
Ст. 0	Не менше 320	18	Невідповідальні конструкції: шайби, прокладки, огорожі, кожухи та ін.
Ст. 1	320...400	28	Малонавантажені деталі: заклепки, шпінти, кожухи, шайби, прокладки та ін.
Ст. 2	340...420	26	Рами, кільця, валики, осі, кулачки, заклепки
Ст. 3кп	370...470	22	Крюки кранів, кільця, циліндри, гайки, тяги, шатуни, кришки. Зварюваність добра
Ст. 4пс	420...540	20	Вали, осі, тяги, болти, шпонки, важелі, клини
Ст. 5сп	540...570	16	Вали, осі, пальці, упори підшипників, зірочки
Ст. 6сп	640...670	12	Вали, осі, шпинделі, муфти, бойки молотів
Ст. 7пс	700...740	9	Деталі інтенсивного зносу та важких умов

Примітка. Між межею міцності при розриві та твердістю за Брінеллем існує залежність для сталі з твердістю: $HV < 1750 \text{ МПа} - \sigma_B \approx 0,343HV$; $HV > 1750 \text{ МПа} - \sigma_B \approx 0,361HV$ [19]

Таблиця В.4 – Механічні характеристики якісної конструкційної сталі [18, 19]

Марка сталі	Межа міцності σ_B , МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження Ψ , %	Твердість НВ, МПа (без термічної обробки)
08пс	330	33	60	1310
10пс	340	31	55	1430
15	380	27	55	1490
20	420	25	55	1630
25	460	23	50	1700
30	500	21	50	1790
35	540	20	45	2070
40	580	19	45	2170
45	610	16	40	2290
50	640	14	40	2410

Продовження табл. В.4

55	660	13	35	2550
60	690	12	35	2550
65	710	10	30	2550
70	730	9	30	2690
75	1100	7	30	2850
80	1100	6	30	2850
85	1150	6	30	3020
60Г	710	11	35	2690
65Г	750	9	-	2850
70Г	800	8	-	2850

Таблиця В.5 – Механічні властивості низьколегованої сталі [18]

Марка сталі	Товщина прокату, мм	Механічні властивості			
		межа міцності σ_B , кГ/мм ²	відносне видовження δ , %	ударна в'язкість α_H , кГ·м/см ²	
				при температурі, °С	
				- 40	- 70
14Г	4...10	46	21	3,5	–
19Г	4...10	48	22	3,5	–
09Г2	4...10	45	21	3,0	–
14Г2	4...10	47	21	3,5	–
18Г2	8...10	52	21	4,0	–
12ГС	4...10	47	26	–	–
16ГС	4...10	50	21	4,0	3,0
17ГС	4...10	52	23	4,5	–
09Г2С	4...10	50	21	4,0	3,5
10Г2С1	4...10	52	21	4,0	3,0
15ГФ	4...10	52	21	4,0	–
14ХГС	4...10	50	22	4,0	–
15ХСНД	4...10	50	21	3,0	3,0
10ХСНД	4...10	54	19	5,0	–

Примітка. Між межею міцності при розриві та твердістю за Бринеллем існує залежність для сталі з твердістю: $HV < 1750 \text{ МПа} - \sigma_B \approx 0,343HV$; $HV > 1750 \text{ МПа} - \sigma_B \approx 0,361HV$ [19].

Таблиця В.6 – Взаємозв'язок твердості за Бринелем та механічними властивостями легованої конструкційної сталі діаметром або товщиною до 5 мм [18]

Група сталі	Марка сталі	Діаметр відбитка d, мм	НВ, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	α_n , кг·м/см ²
Хромиста	15ХА	4,5	1790	700	12	45	7
	30Х	4,4	1870	900	12	45	7
	35Х	4,3	1970	930	11	45	7
	45Х	4,0	2290	1050	9	45	5
Марганцевиста	15Г	4,7	1630	420	26	55	–
	30Г	4,3	1970	550	20	45	8
	45Г	4,0	2290	630	15	40	5
	30Г2	4,2	2070	600	15	45	–
	45Г2	4,0	2290	700	11	40	–
Хромомарганцева	18ХГ	4,4	1870	900	10	40	–
	18ХГТ	4,1	2170	1000	9	50	8
	27ХГР	4,1	2170	1400	8	45	6
	35ХГФ	4,2	2070	930	14	55	8
Хромокремніста	33ХС	3,9	2410	900	13	50	8
	40ХС	3,8	2550	1250	12	40	3,5
Хромованадієва	15ХФ	4,4	1870	750	13	50	8
	40ХФА	3,9	2410	900	10	50	9
Хромонікелева	20ХН	4,3	1970	800	14	50	8
	45ХН	4,2	2070	1050	10	45	7
	12ХН3А	4,1	2170	950	11	55	9
Хромомарганце-ванікелева	20ХГНР	4,3	1970	1300	10	50	9
	38ХГН	4,0	2290	800	12	45	10
Хромомолібденова	15ХМ	4,5	1790	450	21	55	12
	30ХМА	4,0	2290	950	12	50	9
Хромокремністо-марганцева	20ХГСА	4,2	2070	800	12	45	7
	30ХГС	4,0	2290	1100	10	45	4,5
Хромонікель-молібденова	20ХН2М	4,0	2290	900	11	50	8
	38ХН3МА	3,7	2690	1100	12	50	8
Хромонікель-ванадієва	20ХН4ФА	3,7	2690	900	12	50	10
	45ХН2МФ	3,7	2690	1450	7	35	4
Хромоалюмінієва	38Х2Ю	4,0	2290	900	10	45	8
Хромоалюмінієва з молібденом	38ХМЮА 38Х2МЮ	4,0	2290	1000	14	50	9
Підшипникова	ШХ15	4,2-4,5	1790... 2070	740	20	45	–

Таблиця В.7 – Механічні властивості вуглецевих інструментальних сталей [20]

Марки сталі	Твердість HRC
У7	54...60
У8	56...61
У9	61
У10	57...65
У11	58...63
У12	59...63
У13	61...63

Таблиця В.8 – Фізико-механічні властивості інструментальних швидкорізальних сталей [24, 21]

Марка сталі	γ , кг/м ³ ($\times 10^3$)	HRC	σ_b , МПа	a_n , МДж/м ²	Маса карбідної фази, %
P18Л	8,6	64	2430	147,0	25
P12Л	8,5	51	1530	143,0	23
P9Л	8,4	59	1510	130,0	20
P6M3Л	8,4	61	–	70,0	20
P9K5Л	8,3	60	–	–	21
P10K5Ф5Л	8,2	59	–	–	24
B11M7K23		67			

Таблиця В.9 – Фізико-механічні властивості деяких надтвердих сплавів [28, 29]

Марка сплаву	ρ , 10^{-3} кг/м ³	σ_t , МПа	HRA
Вольфрамові			
ВК3	15...15,3	1100	89,5
ВК4	14,9...15,2	1400	89,5
ВК6	14,6...15	1500	88,5
ВК8	14,4...14,8	1600	87,5
ВК10	14,2...14,6	1650	87
ВК15	13,9...14,1	1800	86,0
ВК20	13,4...13,7	1950	84,0
ВК25	12,9...13,2	2000	82,0
Титановольфрамові			
T30K4	9,5...9,8	950	92
T15K6	11,1...11,6	1150	90

Продовження табл. В.9

Марка сплаву	ρ , 10^{-3} кг/м ³	σ_t , МПа	HRA
T5K10	12,4...13,1	1400	88,5
T5K12	13,1...13,5	1650	87
Титанотанталовольфрамові			
ТТ7К12	13...13,3	1650	87
ТТ8К6	12,8...13,3	1250	90,5
ТТ10К8	13,5...13,8	1300	89,0
ТТ20К9	12...13	1300	89
Безвольфрамові			
ТН20	5,5...6	1100	90
КНТ16	5,6...6,2	1350	89

ДОДАТОК Г

Механічні властивості сталей після термічної обробки

Таблиця Г.1 – Механічні характеристики якісної конструкційної сталі після гартування [19]

Марка сталі	Твердість НВ, МПа
08	1790
10	1870
15	1970
20	2070
25	2170
30	2290
35	2290
40	2410
45	2410
50	2550
55	2690
60	2690

Таблиця Г.2 – Твердість сталей після ізотермічного відпалу

Марка сталі	Твердість НВ, МПа	Діаметр відбитку, мм, при d = 10 мм, P = 3000 кгс
Сталі невеликої прогартуваності		
У8А – У12А, У8 – У12	1660...1920	4,35...4,65
У13А, У13, 11ХФ	1700...1960	4,3...4,6
13Х	1790...1960	4,3...4,5
В2Ф	1870...2280	4,0...4,5
ХВ4	2280...2860	3,6...4,0
Сталі підвищеної прогартуваності		
Х	1870...2280	4,0...4,4
Типу 9Г2Ф	1700...1960	4,3...4,6
9ХВГ	1960...2410	3,9...4,3
ХВГ	2070...2550	3,8...4,2
9ХС	1960...2410	3,9...4,3
ХВСГ, 12Х1, типу 120ХВМ	2960...2350	3,95...4,3
Типу 150СХ3	2290...2680	3,7...4,0
Сталі високої прогартуваності		
7ХГ2ВМ, 7ХГНМ	2280...2480	3,9...4,1
Типу ХГ2ВМ і ХГ3М	2280...2550	4,8...4,0

Таблиця Г.3 – Орієнтовні режими термічного оброблення і твердість конструкційних вуглецевих сталей [22]

Марка сталі	Температура нагрівання під гартування, °С	Охолоджувальне середовище	Температура відпуску, °С	Твердість після гартування і відпуску, HRC
35	840...880	Вода	300...400	50...40
			400...500	40...30
			500...600	30...23
40	820...860	Те саме	200...300	52...48
			300...400	48...41
			400...500	40...33
			500...600	33...22
45	810...840	«	200...300	54...50
			300...400	50...41
			400...500	41...33
			500...600	33...24
			600...700	24...15
50	800...840	«	180...200	55...50
			380...400	48...40
			500...550	33...24
			560...620	24...20
60	785...820	Вода – олива	400	40...35
			550...620	24...18
70	770...815	Те саме	400	46...39
			610...670	27...22
У7	750...760	«	160...200	63...60
			200...300	60...54
			300...400	54...43
			400...500	43...35
У8	750...760	«	160...200	64...60
			200...300	65...60
			300...400	55...45
			500...600	35...27
У9	750...760	«	160...200	64...62
			200...300	62...56
			300...400	56...46
			400...500	46...37
			500...600	37...28
У10	760...780	«	160...200	64...62
У12	760...780	Олива	160...200	65...62
			200...300	62...57
ШХ15	840	Олива	160	63...65
			200	61...63

Таблиця Г.4 – Механічні властивості і режим термічної обробки сталей для різального інструмента [29]

Марка сталі	Режим термообробки (температура, °С; охолоджуюче середовище)		Твердість HRC
	Гартування	Відпуск	
У13 У13А	760...780, В	150...160 200...220	62...63 58...59
7ХФ	820...840, М 800...820, В	200...220	58...60
11ХФ	810...840, В 840...860, М	150...170	62...65
В2Ф	780...840, М 780...840, В	150...180	62...65
Х	840...860, М 840...860, М	130...150 170...210	62...65 58...60
9ХС ХВГ	840...860, М 830...850, М 830...850, М	160...180 150...200 200...300	58...62 62...63 58...62
6ХС	860...900, М	350...450	40...48
6ХВ2С	940...960, М	430...470	44...45
Р18 Р12 Р9	1270...1290 1240...1260 1210...1240	560...570 550...570 550...570	62...65 62...65 62...64
Р6М3	1200...1230	540...560	62...64
Р6М5	1200...1230	540...560	63...65
Р18Ф2	1270...1290	560...580	63...66
Р14Ф4	1240...1260	560...580	63...66
Р12Ф3	1240...1260	550...570	62...65
Р9Ф5	1230...1250	560...580	63...65
Р6М5Ф3	1210...1230	540...560	63...65
Р9К10	1220...1240	560...580	63...66
Р9К5	1220...1240	560...580	63...66
Р18К5Ф2	1270...1290	560...580	64...67
Р14Ф4 Р9Ф5	1230...1260	560...580	63...66
Р10К5Ф5	1220...1250	560...580	64...67
Р6М5К5	1210...1240	540...560	64...66

Таблиця Г.5 – Режим термічної обробки і твердість сталей для штампів холодного деформування

Марка сталі	Режим термообробки (температура, °С)		Твердість HRC
	Гартування	Відпуск	
7ХЗ	850...880 I, II	440...450	48...52
		450...490	44...48
5ХНМ 5ХГМ	830...860 I, II	380...420	48...52
		420...500	44...48
		500...550	40...45
4Х5МФС	1000...1020 III	520...550	52...55
		550...570	48...52
		570...590	44...48
4Х4ВМФС	1050...1070 III	520...540	54...56
		540...580	52...54
		580...620	48...52
		620...640	44...48
5Х3В3МФС	1120...1140 III, IV	540...560	54...56
		600...620	48...52
		620...650	44...48

Таблиця Г.6 – Режим термічної обробки і твердість сталей для штампів гарячого деформування

Марка сталі	Режим термообробки (температура, °С)		Твердість HRC
	Гартування	Відпуск	
Низьколеговані сталі			
8ХФ	830...860	200...220	60...62
9ХФ	850...880	200...250	58...60
9ХІ	820...850	160...180	59...61
ХГС	820...860	150...160	61...63
ХВГ	830...850	150...250	60...63
9ХВГ	820...840	170...250	68...62
Високолеговані сталі			
Х12	950...980	180...200	60...62
Х12ВМ	1000...1030	180...200	60...62
Х12	1000...1030	190...210	60...63
Х6ВФ	980...1000	150...170	62...63
Х6Ф4М	980...1020	160...180	61...62
8Х4В2С2 МФ	1060...1090	530...540	62...63
8Х4В3М3 Ф2	1155...1175	550...560	60...61

Таблиця Г.7 – Твердість сталей, що використовують для цементації і гартування з відпуском [25]

Марка сталі	Твердість НВ, МПа
15Х	1790
20Х	2120
20ХР	2120
18ХГТ	2400
15ХГНГА	2290
30ХГТ	2700
20ХФ	2400
20ХГНР	3210
14ХГ2СР	3500
15ХНГ2ВА	3630
15Х2Г2СВА	3630
18Х2Н4В (М) А	3700
18Х2Н4 (М) А	2760

Таблиця Г.8 – Механічні характеристики сталей, що використовують для цементації і гартування з відпуском [22]

Марка сталі	Глибина цементованого шару, мм	Твердість після цементації і гартування з відпуском, HRC	Температура цементації $t_{\text{цем}}, ^\circ\text{C}$	Температура гартування $t_{\text{гарт}}, ^\circ\text{C}$	Температура відпускання $t_{\text{відп}}, ^\circ\text{C}$	Деталі
10	0,2...1,5	56...62	920...950	790...810	180...200	Втулки, муфти
15		57...63	900...920	760...780	160...200	
20		55...63	920...950	800...820	180...200	
25		55...63	920...950	820...840	180...200	
20Г	1,6	56...63	920...950	810...830	180...200	Стакани, вали
20Х	0,7...1,1	56...63	920...950	780...820	180...200	Вали, шестерні
20ХН3А	0,6...1,8	56...63	920...950	780...820	180...200	Шестерні, вали
12ХН3А				790...810	180...200	Черв'яки, пальці, осі
18ХГТ	0,6...1,7	56...63	920...950	820...860	180...200	Шестерні, вали
25ХГТ				840...860	190...210	Черв'яки, муфти, хрестовини
20ХНР 20ХГНР	0,6...1,7	56...63	930	820...840	180...200	Черв'яки, пальці, втулки, осі
18ХН4ВА	0,3...0,9	56	920...950	780...820	150...200	Корпуси розпилювачів

Таблиця Г.9 – Механічні властивості пружинно-ресорних сталей після гартування та середньотемпературного відпуску [26]

Сталь	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ
65	1100	800	10	2550
50С2	1200	1100	56	2850
70С3А	1800	1600	6	–
55С2	1300	1200	6	2410
60С2	1300	1200	6	2690
60С2А	1600	1400	6	2690
60С2ХФА	1900	1700	5	2850
65С2ВА	1900	1700	5	5850
50ХГА	1300	1200	7	2690
50ХФА	1300	1100	6	2690

Таблиця Г.10 – Механічні властивості легованих сталей для різального інструменту [29]

Марка сталі	Температура гартування, °С	Твердість НРС після гартування	Температура відпуску, °С	Твердість НРС після відпуску
9ХФ	850...880	60...64	200...240	58...60
11ХФ	840...860	62...64	150...170	62...63
13Х	780...810	64...66	150...170	62...64
ХВ4	800...820	65...67	140...170	62...65
В2Ф	820...850	62...65	150...180	62...64
9Х1	820...850	61...63	160...180	59...61
12Х1	850...870	62...64	160...180	61...63
Х	840...860	62...63	130...150	62...63
9ХС	840...860	62...63	160...180	58...62
ХГС	820...860	62...64	160...180	60...62
9ХВГ	820...840	64...66	160...180	60...62
ХВГ	830...850	62...63	150...200	60...62
ХВС1	840...860	62...63	140...160	60...62
9Х5ВФ	950...1000	59...61	160...180	58...60
8Х6НВТ	950...1000	58...60	160...180	56...58
8Х4В3М3Ф2	1150...1170	60...62	160...180	58...60

Примітка. Сталі 13Х, ХВ4, В2Ф загартовують у воді, а решту в маслі.

Таблиця Г.11 – Механічні властивості кулькопідшипникових сталей після гартування та низькотемпературного відпуску [26]

Сталь	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	HRC
ШХ6	1100	900	8	62...64
ШХ9	1150	950	9	63...65
ШХ15	1180	980	9	63...66
ШХ15СГ	1230	985	7	65...66

Таблиця Г.12 – Механічні властивості сталей після поліпшення [27]

Сталь	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ, МДж/м ²	НВ
30Х	900	700	12	0,7	1630
30ХГС	1100	850	10	0,4	2070...2170
40ХН	1000	800	11	0,7	1660...1700
30ХН3А	1000	800	10	0,8	2280...2350

Таблиця Г.13 – Механічні характеристики сталей, які використовують для азотування [22]

Марка сталі	Глибина азотованого шару, мм	Твердість, НВ	Режим азотування		Деталі
			t , °С	τ , год	
38ХМЮА	0,5...0,8	1000...1150	510...540	90...95	Гільзи циліндрів, деталі паливних насосів, шпинделі
38ХВФЮА	0,5...0,8	850...950	510...540	40...30	Колінчасті вали, шестерні, шпинделі, деталі паливних насосів
18Х2Н4ВА	0,5...0,8	600...700	510...540	30...35	
Х18Н10Т	0,2...0,4	900	600	75	Лопатки газових турбін, плунжери
25Х5МА	0,1...0,4	800...1000	510	35	

Таблиця Г.14 – Механічні характеристики сталей, які використовують для нітроцементзації [22]

Марка сталі	Глибина шару S , мм	Твердість, HRC	$t_{HTЦ}$, °С	$t_{гарт}$, °С	$t_{відп}$, °С	Деталі
20Х 20Г 20ХНР 20ХГА	0,3...1,2	54...62	920...950	780...820 810...830 820...840 840...860	180...200	Пальці, осі, шестерні, втулки, муфти, стакани
40Х 20ХГНР 20ХНР	0,3...0,5 0,6...1,1 0,6...1,7	56...63	930	840...860 820...840 820...840	180...200	Шестерні, пальці, осі, вали, черв'яки, штовхачі

Продовження табл. Г.14

Марка сталі	Глибина шару S , мм	Твердість, HRC	$t_{\text{НТЦ}}$, °C	$t_{\text{гарт}}$, °C	$t_{\text{відп}}$, °C	Деталі
18ХГТ 20ХГТ 25ХНТЦ 25ХГМ	0,6...1,7	56...63	920...950	820...860 840...860 840...860 840...860	180...200	Осі, штовхачі, пальці, шестерні
08кп	0,1...0,3	56...60	860...880	860...880	180...200	Втулки, коромисла, болти

Електронне навчальне видання

**Олег Володимирович Березюк
Валерій Іванович Савуляк**

Методичні вказівки

для виконання практичних занять

**«Моделювання підйомно-транспортних механізмів з
використанням рівнянь регресії для забезпечення
безпечного функціонування» здобувачами
спеціальностей 132 «Матеріалознавство»
та 133 «Галузеве машинобудування»**

Рукопис оформив *О. Березюк*

Редактор *Н. Слободянюк*

Оригінал-макет виготовлено в РВВ ВНТУ

Підписано до видання 12.12.2024

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2024-196.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95,

м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: irvc.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК No 3516 від 01.07.2009 р.