

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.833 : 62-233.3

І.Є. Грицай, А.В. Козак
Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра технології машинобудування

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЕВОЛЬВЕНТНИХ ПРОФІЛІВ У МЕТОДІ ЗМІЦНЮВАЛЬНО- ВИКІНЧУВАЛЬНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

© Грицай І.Є., Козак А.В., 2008

Наведено результати аналітичного дослідження процесу формування поверхневого шару. Виконано аналіз сили зсуву поверхневого пластичного деформування від факторів процесу та висоти мікронерівностей у проявах віброколивань та статичного тиску в системі.

Give example results of analytic research process of formation surface layer. Done an analyse of move power of surface plastic deformation from factors of processes and height of microrough in manifestation of vibration and statistic pressure in system.

Вступ. Показники якості зубчастих коліс, як невід’ємних складових сучасних машин регламентують експлуатаційну надійність передач та приводів. Для підвищення довговічності та часу безвідмовної роботи передач, редукторів, коробок швидкостей, в яких втрата працездатності найчастіше настає внаслідок спрацювання або ламання зубців, робочі поверхні зубчастих коліс піддають поверхневому зміцненню.

Для вибору оптимальних, або, принаймні, раціональних технологічних і технічних параметрів процесу необхідно мати його математичне описання. Це особливо важливо для нових, ще не досліджених технологічних процесів. У роботі [1] запропоновано метод чистового оброблення та поверхневого зміцнення зубчастих коліс, який здійснюється на основі віброколивань на поверхнях зубчастого інструменту-обкатника і оброблюваного зубчастого колеса. Одночасно з коливаннями на поверхнях контакту створюється незначний статичний тиск внаслідок попереднього радіального зближення між інструментом і заготовкою.

На відміну від відомих методів оброблення зубчастих коліс (силового обкочування, вібросилового оброблення і зміцнення), у запропонованому методі статичне зусилля має допоміжне значення, посилюючи тертя і тепловий вплив під час пружних коливань. Дія вібрацій з амплітудою 0,01–0,06 мм і частотою 60–500 Гц має неударний характер, така дія забезпечує реалізацію певної кількості циклів тертя на контактних поверхнях і зумовлює інтенсивне теплоутворення.

Розглянемо закономірності і послідовність формування нової поверхні заготовки в ділянці тертя і поверхневого зміцнення.

Етап 1. При попередньому статичному навантаженні технологічної системи і радіальному зближенні поверхонь заготовки та інструменту, внаслідок дії нормальної до поверхні зубця сили відбувається змінання вершин мікронерівностей. Оскільки поверхня інструменту шліфована і загартована до високої твердості (49...53 HRC), а попередньо оброблена поверхня заготовки є “сирою” (180–200 HB) з шорсткістю Rz 16 – 20, очевидно, що пластичному деформуванню буде підлягати поверхня заготовки. Після змінання вершин виступів зменшиться висота мікронерівностей та збільшиться площа опорної поверхні заготовки.

Етап 2. На новоутвореній поверхні починається процес деформування мікронерівностей дотичною до евольвенти профілю (тангенційною) силою, зумовленою дією віброколивань. У результаті дії тангенційної сили у поверхневому шарі відбувається пластичне деформування, яке є процесом простого зсуву. Після зсувної деформації зменшується висота мікронерівностей та збільшується опорна ділянка профілю мікронерівностей.

Етап 3. У результаті процесу сухого тертя ковзання під час повздовжніх вібропереміщень контактних поверхонь відбувається інтенсивне виділення теплоти, виникнення теплових потоків у тіла заготовки та інструменту і нагрівання цих елементів. Процес теплоутворення і теплопередачі є короткотривалим і відбувається в обмеженому міжзубному просторі, що закінчується на торцях зубчастих вінців. Ці особливості теплового процесу дають підстави вважати його адіабатичним. Баланс у розподілі теплоти між колесом і обкатником визначиться співвідношенням теплопровідностей їх матеріалів та характеристиками поверхонь колеса і обкатника (насамперед твердістю і шорсткістю).

Етап 4. Тепловиділення в просторі обмежених розмірів спричиняє інтенсивне нагрівання поверхні заготовки та зміну механічних властивостей поверхневого шару. Як наслідок – за незмінної величини зусиль, які діють у системі та контактного тиску інтенсифікуються процеси на поверхнях контакту. Підвищення температури призводить до підвищення пластичних властивостей металу, зменшення межі міцності на зсув та стискання та сприяє глибшому зміцненню поверхневих шарів зубців, при цьому створюються умови для швидкісного зміцнення поверхні [2]. Для посилення теплової дії та інтенсивнішого мікрорізання на поверхні інструменту нанесено регулярний рельєф, наприклад, рифлення, накатку або насічки.

У зубчастому зачепленні вектор віброколивань скерований під кутом до профілю, а його величина змінюється на куті розгорнутості евольвенти. У кожний момент часу цей вектор проектується на нормаль до евольвенти та на напрямок, дотичний до профілю. Нормальна складова амплітуди коливань зумовлює динамічне зміцнення поверхні. Складова амплітуди, скерована дотично до профілю, спричиняє додаткове ковзання на поверхнях контакту.

Сили у зачепленні та їх зміна по куту розгорнутості евольвенти. Сили, які діють на поверхнях контакту (рис. 1) змінюються за кутом повертання за величиною і за напрямком, тому необхідно встановити закономірності зміни цих сил на довжині лінії зачеплення.

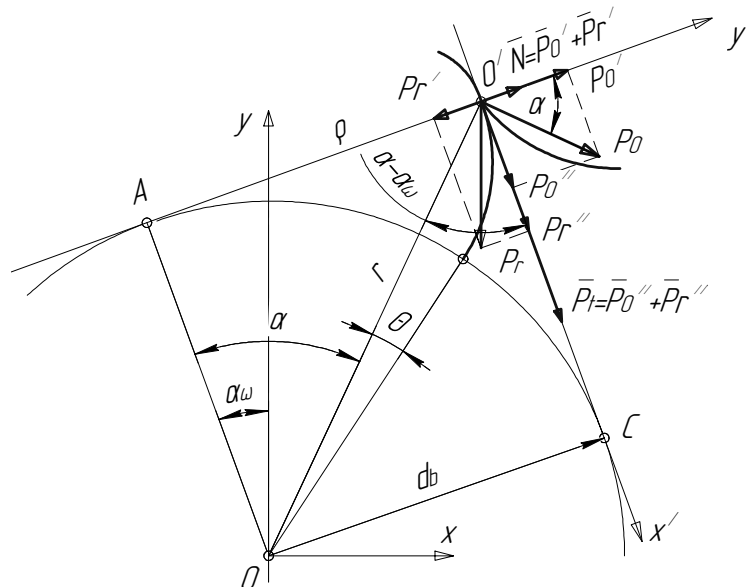


Рис. 1. Схема сил, які діють на поверхнях контакту

Тут α_{ω} – полярний кут евольвенти; α – кут розгорнутості евольвенти; Γ – радіус-вектор точки на евольвенті; θ – кут зачеплення у передачі. У рухомій системі координат $Y^1O^1X^1$ з

переміщенням її центра O^1 відносно т. O системи координат зубчастого колеса XOY кутове положення осей O^1X^1 і O^1Y^1 залишається незмінним, оскільки контакт профілів відбувається по лінії зачеплення. На основі наведеного розкладу сил подамо їх проекцію на напрямок, нормальний до профілю оброблюваного зубчастого колеса O^1Y^1 і на напрямок, дотичний до цього профілю – O^1X^1 :

$$\begin{aligned} N &= P_o \cdot \cos(\alpha - \alpha_\omega) + P_r \cdot \sin \alpha_\omega \\ R_t &= -P_o \cdot \sin(\alpha - \alpha_\omega) + P_r \cdot \cos \alpha_\omega \end{aligned} \quad (1)$$

$$P_o = \frac{2 \cdot T}{m \cdot z} \cdot 10^3, \quad (2)$$

де P_o – окружна сила на зубчастому колесі, Н; T – обертовий момент на валу зубчастого колеса (на шпинделі верстата), Нм; P_r – радіальна сила в зачепленні, зумовлена попередньою статичною деформацією в системі.

Пластичне деформування поверхневого шару як процес зсуву та мікрорізання. Як було зазначено, деформування мікронерівностей поверхнею обкатника має характер простого зсуву. Оскільки процес різання теж є зсувом, то це дає підстави розглядати змінання мікронерівностей на поверхні зубця як процес мікрорізання та використати основні положення теорії різання до описання деформаційних процесів у розробленому методі.

Як відомо, за інтенсивних навантажень та пружнопластичного деформування тангенційною силою, прикладеною до поверхні твердого тіла, коефіцієнт осадження мікронерівностей ξ дорівнюватиме коефіцієнту тертя f [2].

Сила тертя визначається результируючою силою F_t , яка діє дотично до профілю, спричиняє зсув на поверхні контакту, з урахуванням виразів (1) і (2) подамо силу зсуву так:

$$F_t = R_t + N \cdot f = P_o \cdot [\cos(\alpha - \alpha_\omega) - \sin(\alpha - \alpha_\omega)] + P_r \cdot f \cdot (\sin \alpha_\omega + \cos \alpha_\omega). \quad (3)$$

На рис. 2 показана залежність сили F_t від кута повороту і модуля зубчастого колеса при постійній кількості зубців, а на рис. 3 – зміну цієї сили від кількості зубців при постійному модулі. Збільшення сили зсуву на поверхнях у разі зменшення модуля пояснюється зменшенням розмірів колеса (за кількості зубців $z = 30$) і відповідним збільшенням окружної сили та обертового моменту.

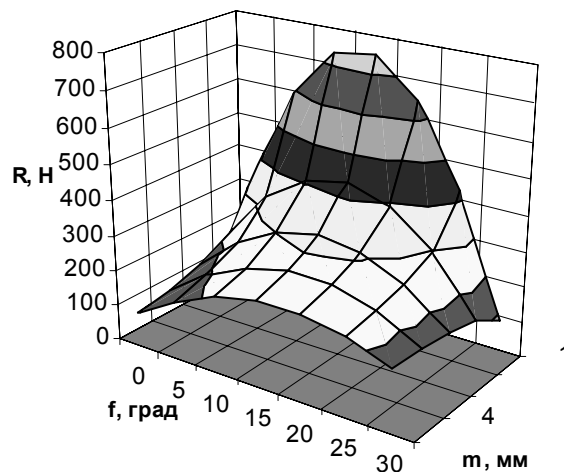


Рис. 2. Сила зсуву за кутом повороту колеса залежно від модуля $z = 30$; кут зачеплення $\alpha_\omega = 20^\circ$; коефіцієнт тертя $f = 0,15$; радіальне статичне навантаження системи 30–210 Н

З рис. 3 випливає, що дотична до профілю сила має найбільші значення біля ніжки зубців, де присутнє найбільше тертя, монотонно зменшується до полюса зачеплення і набуває дещо більших значень біля головки зубців.

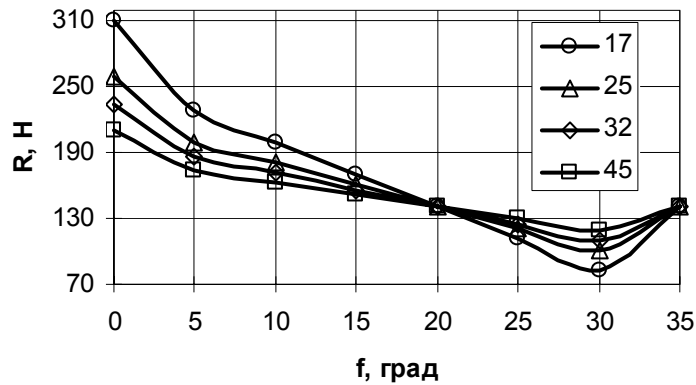


Рис. 3. Сила зсуву за кутом повороту профілю залежно від кількості зубців колеса радіальне статичне навантаження системи 152 Н, обертовий момент на шпинделі 10Нм; $m = 3$ мм

З теорії різання відомо, що між кутом зсуву і осадженням стружки існує залежність:

$$\xi = ctg\Phi \cdot \cos \gamma + \sin \gamma, \quad (4)$$

де Φ – кут зсуву, γ – передній кут інструменту. Для $\gamma = 0$: $\xi = ctg\Phi$.

Оскільки за умовою $f = \xi$, а $f = F_t / N$, то з виразу (4) отримаємо

$$\Phi = actg f = actg \frac{F_t}{N}. \quad (5)$$

Враховуючи, що складова сили R_t змінюється за кутом повороту колеса, у функції від кута розгорнутості евольвенти кут зсуву набуде вигляду

$$\Phi = actg f = actg \frac{F_t}{N} = actg \left(\frac{R_t}{N} \cdot \sin \theta + f \right) \quad (6)$$

На рис. 4 показано графіки залежності кута зсуву від кута повороту колеса для різних модулів, а на рис. 5 – від величини радіального статичного навантаження. Як видно з графіків, найінтенсивніше деформування зовнішніх шарів відбувається біля ніжок зубців та біля їх вершин на граничному куті розгорнутості евольвенти. Це можна пояснити найбільшою швидкістю ковзання профілів і підвищеним тертям на цих ділянках контакту.

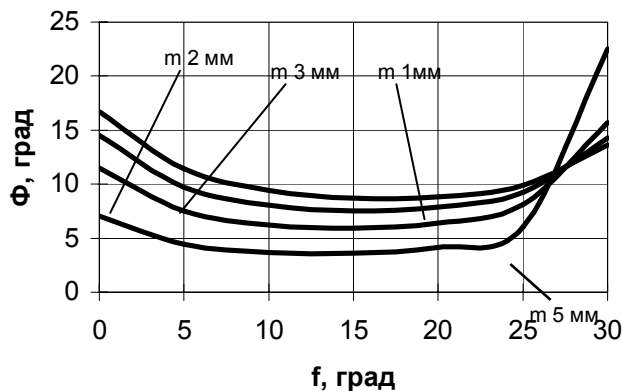


Рис. 4. Кут зсуву залежно від кута повороту і модуля зубчастого колеса при $z = 30$, кут зачеплення $\alpha_w = 20^\circ$; коефіцієнт тертя $f = 0,15$; радіальне навантаження системи 30 Н

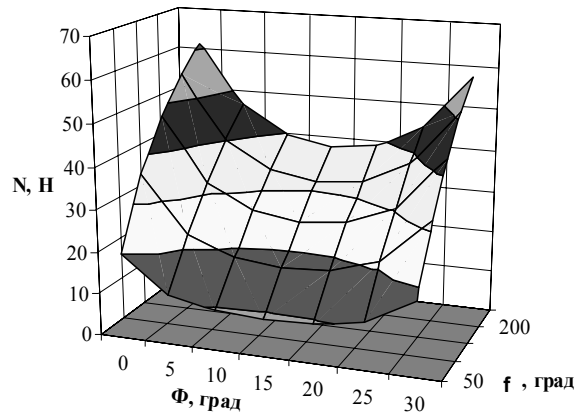


Рис. 5. Кут зсуву залежно від кута повороту і статичного радіального зусилля в передачі
 $t = 3 \text{ мм}$; $z = 30$; кут зачеплення $\alpha_{\omega} = 20^{\circ}$; коефіцієнт тертя $f = 0,15$

Шорсткість поверхневого шару. Як відомо, в теорії різання коефіцієнт осадження стружки ξ визначається відношенням товщини стружки (шару після деформації) до товщини зрізу (шару до початку деформації), тобто: $\xi = \frac{a_c}{a}$.

У нашому випадку величина a тотожна висоті мікронерівностей R_1 до деформування, (тобто, після статичного зближення), а величина a_c тотожна висоті мікронерівностей R_2 після деформування зсувом. Оскільки $a_c = a \cdot \xi$, то на основі цієї залежності можемо визначити величину y_2 :

$$R_2 = R_1 \cdot \xi = R_1 \cdot \text{atg} \left(\frac{R_1}{N} \cdot \sin \theta + f \right) \quad (7)$$

Нова висота деформованого шару відповідає новому значенню параметра шорсткості R_2 .

У нашому методі кількість зсувів на одній ділянці поверхні зубчастого колеса визначається кількістю циклів тертя у вібропереміщенні поверхонь, які перебувають у контакті. Якщо позначимо цю кількість циклів як N_{ψ} , то не важко встановити, що після N_{ψ} циклів висота мікронерівностей на цій ділянці визначиться залежністю

$$R_{N_{\psi}} = \frac{R_1}{\xi^{N_{\psi}-1}} \quad (8)$$

Значення коефіцієнта осадження мікронерівностей під час пластичного деформування поверхневого шару залишається постійним для цих матеріалів зубчастого колеса і обкатника, а також за незмінних робочих режимів. На рис. 6 показано залежність зменшення висоти мікронерівностей від коефіцієнта осадження деформованого шару та кількості циклів зсуву; початкова висота мікронерівностей $R_1 = 20 \text{ мкм}$.

Тиск і контактна жорсткість стику. Як вказано вище, у початковий момент процесу внаслідок прикладання статичного навантаження відбувається змінання мікрооб'ємів поверхонь зубців заготовки і зближення евольвентних профілів заготовки і інструменту.

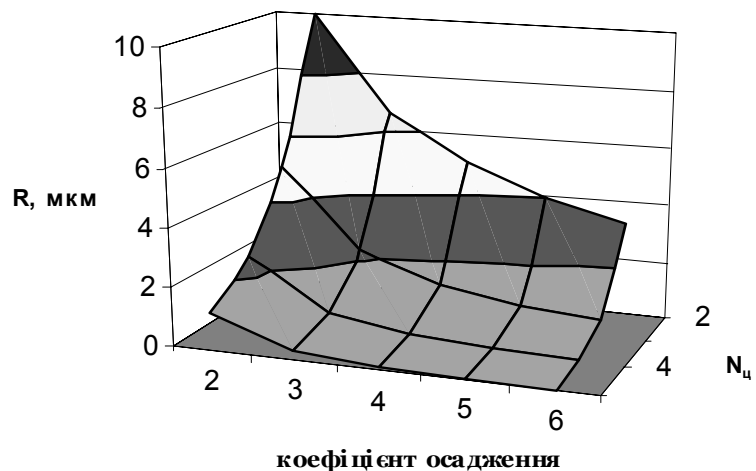


Рис. 6. Залежність висоти мікронерівностей від коефіцієнта осадження мікронерівностей та кількості циклів віброколивання

У межах ділянки контакту профілів шліфвану поверхню обкатника будемо вважати гладкою, а шорсткість зубців після попереднього нарізання становить Rz 16–20 мкм. Пружний контакт поверхні зубця заготовки і інструменту в межах одиничного виступу мікронерівності приймемо, як контакт гладкої поверхні з поверхнею сфери. Для цього випадку скористаємося залежністю для розрахунку радіального зближення, що отримана на підставі формули Герца [2]:

$$R = 0,83 \cdot \left[\frac{N^2}{r} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (9)$$

де $\mu_{1,2}$, $E_{1,2}$ – відповідно коефіцієнти Пуассона і модулі пружності матеріалів обкатника і заготовки; r – радіус округлення вершини виступу (сфери); N – нормальна до профілю сила.

За експериментальними даними [3] радіус кривизни опорної поверхні профілю для попередньо оброблених поверхонь становить [3]

Параметр шорсткості поверхні R_a , мкм	Радіус кривизни опорної поверхні профілю, мкм	
	в поздовжньому напрямку, r_x	в поперечному напрямку r_y
5–0,32	10–25	20–120

Наведений радіус опорної поверхні: $r = \sqrt{r_x^2 \cdot r_y^2}$. Згідно з даними Н.Б. Демкина і Е.В. Рижова для умов, близьких до зубофрезерування, $r = 15 - 55$ мкм.

На підставі досліджень І.В. Крагельського і Н.Б. Демкина відносна площа контакту на відстані від вершини виступу до рівня поверхні основи профілів, що дорівнює $(R_z - R)$, визначається із залежності

$$\eta = b \cdot \left(\frac{R}{R_z} \right)^v = \frac{S_\phi}{S_H} \quad (10)$$

де b , v – параметри, залежні від виду обробки; S_H , S_ϕ – фактична і номінальна (максимально можлива) площі контакту. Величини b і v для поверхонь попередньо нарізаних зубців приймемо як для поверхонь після фрезерування і токарної обробки: $v = 3$; $b = 1-3$.

Залежності (9)–(10) дають можливість визначити величину зближення поверхонь на першому етапі, тиск на фактичних поверхнях контакту і контактну жорсткість стику (рис. 7).

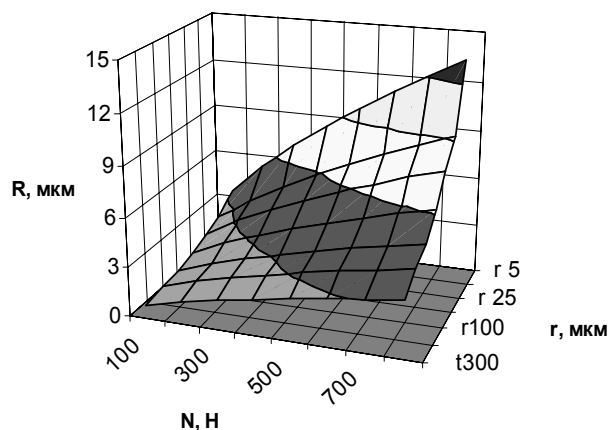


Рис. 7. Залежність величини зближення поверхонь від нормальної сили та радіуса округлення мікровиступів
 $E = 2,05 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_1 = 0,26$ (сталь 45, заготовка);
 $\mu_2 = 0,3$ (легована сталь, інструмент); ширина вінця 20 мм;
 довжина контакту (для $Rz = 16 - 20$) 2, мм.; коефіцієнт сухого тертя 0,15

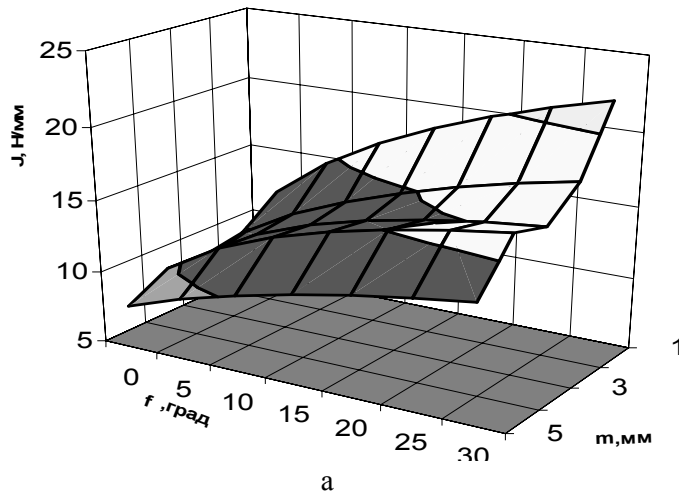


Рис. 8. Залежність контактної жорсткості поверхні у разі початкового зближення під дією радіальної статичної сили 120 Н від модуля зубчастого колеса (а) та кута повороту профілю зубця деталі початкова шорсткість поверхні R_z 16-20 мкм обертовий момент на шпинделя 5,5 Нм, $E = 2,05 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_1 = 0,26$ (сталь 45, заготовка); $\mu_2 = 0,3$ (легована сталь, інструмент); $f = 15$ радіус округлення вершин мікронерівностей 0,5 мм

Висновки. Отже, розглядаючи деформаційні процеси в поверхневих шарах заготовки як процес простого зсуву та мікрорізання, можемо використати для опису процесів та явищ на поверхнях контакту заготовки та інструменту-обкатника основні положення теорії різання. Отримані залежності становлять основу для глибшого вивчення параметрів поверхневих шарів заготовки під дією віброколиваний інструменту та статичного тиску в системі, дозволяють визначити параметри інструменту і назначити робочі режими для забезпечення заданої шорсткості робочих поверхонь зубчастих коліс у методі зміцнювально-викінчувального оброблення зубчастих коліс

1. Грицай І.Є., Кук А.М. Спосіб чистового оброблення і поверхневого зміцнення зубчастих коліс. Патент України на корисну модель № 24170 від 25.06.2007. 2. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с. 3. Петросов В.В. Гидро-дробеструйное упрочнение деталей и инструмента. – М.: Машиностроение, 1977. – 103 с.