

4. Доцільно продовжити роботу в напрямку удосконалення методики визначення необхідного ступеня точності зубчастих коліс і точності елементів всієї передачі з метою забезпечення встановленого ступеня точності зубчастої передачі загалом.

1. Гулида Э.Н. *Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес*. – Львов: Вища школа, 1977. – 168 с. 2. Дунаев П.Ф. *Размерные цепи*. – М.: МашГИЗ, 1963. – 308 с. 3. Зенкин А.С., Петко И.В. *Допуски и посадки в машиностроении // Справочник*. – К.: Техника, 1981. – 256 с. 4. *Передачи зубчатые цилиндрические // ГОСТ 1643-81*. – М., ГОСКОМ СССР по стандартам, 1985. – 66 с.

УДК 621.787

О.Д. Клименко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЦНЮВАЧА ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

© Клименко О.Д., 2003

Застосовуючи електротензометрію та контрольно-вимірну апаратуру для зняття і опрацювання віброграм, досліджено характер змін сили деформування при вібраційно-відцентровому зміцненні зубчастих коліс силових передач. Експериментально встановлено, що сила деформування пропорційна масі та ексцентриситету обкатника зміцнювача та частоті його обкочувального руху і зростає при збільшенні цих конструктивних параметрів. Дані дослідження є підставою для вибору оптимальних, з погляду надійності в експлуатації, конструктивних параметрів вібраційно-відцентрових зміцнювачів зубчастих коліс.

Character of change of force of deformation is investigated at vibratory-centrifugal hardening. Thus it was used electric strain measurement and checking-measuring equipment the instrumentation for vibrograms removing and processing. It is experimentally established, that force of deformation is proportional to weight and eccentricity of an element of strengthening machine and its reeling movements frequency. Deformation force grows at increase of the specified construction data. Researches are the basis for a choice optimum, from the point of view of operational reliability, construction data of vibrating centrifugal strengthening machines for cogwheels.

Загальновідомо, що здебільшого руйнування металевих деталей починається із їх поверхневих шарів, метал яких не тільки знаходиться на межі розділення фаз, а і сприймає переважно більшість експлуатаційних навантажень та зазнає, подекуди, шкідливого впливу навколишнього середовища. Яскравим підтвердженням цьому є зубчасті колеса, матеріал робочих поверхонь зубів яких в поверхневих шарах внаслідок взаємного тертя та контактних навантажень піддається інтенсивному зношуванню і контактному викришуванню. Це зумовило запровадження до технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс відповідальних передач, зокрема силових, оздоблювально-викінчувальних операцій, метою

яких, поряд із забезпеченням належної геометричної точності, є надання поверхневим шарам матеріалу необхідних фізико-механічних властивостей, здатних впродовж всього періоду експлуатації надійно протистояти впливу експлуатаційних навантажень.

Одним із найдієвіших технологічних впливів в когорті оздоблювально-викінчувальних операцій є зміцнення робочих поверхонь зубів поверхневим пластичним деформуванням (ППД), якісне здійснення якого поряд із формуванням зносостійкого мікрорельєфу поверхні зубів, підвищує поверхневу твердість матеріалу, що сприяє збільшенню його опору зношуванню, забезпечує наведення у поверхневих шарах матеріалу напружень стиску, які підвищують опір втомі матеріалу, його здатність протистояти викришуванню.

У нашій державі, як і у багатьох промислово розвинутих країнах світу, широкого розповсюдження для зміцнення зубчастих коліс набули такі методи ППД, як дробоструминне оброблювання, вібростміцнення, накатування бокової поверхні зубів, карбування. У результаті запровадження цих зміцнювальних технологій залежно від режимів їх здійснення на 10 – 15 % зростає опір матеріалу зубів викришуванню, на 15 – 20 % підвищується його зносотривкість. Однак через недостатній рівень енергії деформування матеріалу бокової поверхні зубів можливості відомих методів ППД щодо подальшого покращення експлуатаційних властивостей зубчастих коліс вичерпано. Тому актуальною залишається проблема створення і дослідження нових методів зміцнення зубчастих коліс, спроможних суттєво підвищити ефективність зміцнювальних технологій. Враховуючи масовість випуску зубчастих коліс, значну собівартість їх виготовлення нові зміцнювальні технології поряд із значною енергією деформування повинні відрізнитись високою продуктивністю і простотою використання устаткування.

До числа останніх з світових досягнень в галузі зміцнювальних технологій належить створений в НУ “Львівська політехніка” метод вібраційно-відцентрового зміцнення зубчастих коліс (ВВЗК), який органічно поєднує в собі високу продуктивність обробки із значною, недосяжною для інших, енергією деформування [1, 2]. Метод базується на поверхневому пластичному деформуванні бокової поверхні зубів деформівними елементами, що повторюють профіль западини зуба. Зусилля деформування деформівним елементом надає масивний обкатник, який під дією вібрацій обкочується по деформівних елементах, вводячи їх почергово в ударний контакт із оброблюваною поверхнею зубів. Теоретичними дослідженнями динаміки процесу встановлено, що сила деформування Р-матеріалу бокової поверхні зубів при цьому пропорційна ексцентриситету ε та масі m обкатника і квадрата частоти його обкочувального руху ω , тобто

$$P = m\varepsilon\omega^2. \quad (1)$$

Однак, враховуючи, що метод ВВЗК є новим і недостатньо вивченим для широкого його запровадження у виробничу сферу необхідний комплекс експериментальних досліджень, зокрема впливу основних технологічних параметрів процесу на показники зміцнювальної обробки.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження змін основного технологічного параметра процесу ВВЗК-сили деформування Р залежно від конструктивних параметрів зміцнювача. У задачу досліджень входили:

- розробка і експериментальна перевірка методики визначення сили деформування при ВВЗК;
- вивід на підставі даних експериментального дослідження рівняння регресії, що адекватно описує залежність сили деформування від параметрів зміцнювача;

– оптимізація конструктивних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювача за параметрами забезпечення максимальної сили деформування при найвищій довговічності зміцнювача.

Дані дослідження проводяться вперше і їх результати, поряд із науковою новизною, яка полягає у дослідженні динаміки процесу ВВЗК, матимуть і важливе значення для промислового застосування цієї прогресивної зміцнювальної технології. Адже для будь-якої зміцнювальної технології ППД сила деформування матеріалу оброблюваної деталі є тим основним критерієм, який зумовлює рівень показників якості зміцнення – товщини зміцненого шару, поверхневої мікротвердості зміцненого матеріалу, рівня залишкових напружень. Саме рівнем забезпечуваної сили деформування і обумовлюючої її енергією деформування регламентується сфера доцільного застосування того чи іншого методу ППД, надійність та довговічність зміцнених деталей.

Із даних теоретико-експериментального дослідження механізму зміцнення поверхневим пластичним деформуванням відомо, що для важконавантажених деталей, матеріал яких в умовах експлуатації піддається складному навантажувальному циклу, що обумовлює зношувальне і контактне руйнування матеріалу, оптимальним є забезпечення при зміцненні контактних напружень деформування, близькими до межі текучості зміцнюваного матеріалу σ_m , тобто

$$\frac{P}{S_k} = (0,75 \div 0,85) \sigma_m, \quad (2)$$

де P – сила деформування; S_k – площа контакту деформівних тіл із зміцнюваною поверхнею.

Саме до когорти таких важконавантажених деталей належать зубчасті колеса силових передач, тому конструктивні параметри вібраційно-відцентрового зміцнювача призначають, керуючись вищенаведеною залежністю (2).

Дослідження проводили на зразках-фрагментах зубчастих коліс, виготовлених за типовими технологічними процесами ВАТ “Львівський автобусний завод”, які включали підготівельні операції (нормалізація або низький відпуск), зубофрезерувальні, гартування та зубошліфування. Зразки являють собою фрагмент циліндричного прямозубого зубчастого колеса із двома сусідніми зубами нормального модуля $m_n = 5$ (загальна кількість зубів колеса $z = 27$) та висотою зуба $H = 30$ мм (рис. 1).

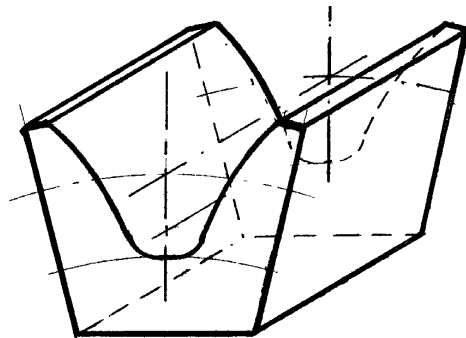


Рис. 1. Дослідні зразки-фрагменти циліндричних прямозубих зубчастих коліс

Чистота бокової поверхні зубів зразків після зубофрезерування знаходилась в межах $R_z = 20 - 40$ мкм, після зубошліфування – $R_a = 1,25 \div 2,5$ мкм.

При дослідженні сили деформування матеріалу бокової поверхні зубів, її змін залежно від конструктивних параметрів зміцнювача та динаміки процесу застосовували методики досліджень коливних і ударних процесів. Схема вимірювання сили деформування у западині зуба при зміцненні сталевими загартованими кульками зображена на рис. 2. Фрагмент зубчастого колеса 1 із завчасно просвердленим спеціальним отвором під проміжний стрижень 3 фіксують в колесі-матриці 2. В отвір встановлюють проміжний стрижень 3, який базується в ньому своєю конічною поверхнею. Верхній торець стрижня 3 розміщений у площині ніжки зміцнюваних зубів, заокруглений нижній – впирається в жорстко закріплену всередині колеса-матриці тензочутливу завчасно протаровану балочку 6. До тензочутливої балочки приклеєно з боку стиснутих і розтягнутих волокон по давачу опору, як зображено на рис. 2, або прикріплено вібродавач. Під час зміцнювального оброблювання обкатники 4 і 5, обкочуючись по виступаючих за впадини зубів деформівних кульках 8 ущільнюють їх і передають через них жорсткий удар боковій поверхні зубів, поверхням радіусних переходів у ніжку зуба, поверхні впадини. Через кульки 8 удар передається і на верхній торець проміжного стрижня 3, внаслідок чого він переміщається вздовж осі отвору. Переміщення стрижня 3 передається тензочутливій балочці 6, яка при цьому прогинається. Прогин тензочутливої балочки 6, що пропорційний переміщенням проміжного стрижня 3 і обумовлюючої їх сили деформування, фіксується у вигляді електричного сигналу закріпленими на балочці давачами опору 7 або вібродавачем. Сигнали реєструються записувальною апаратурою і їх обробка дозволяє визначити реальні значення сили деформування.

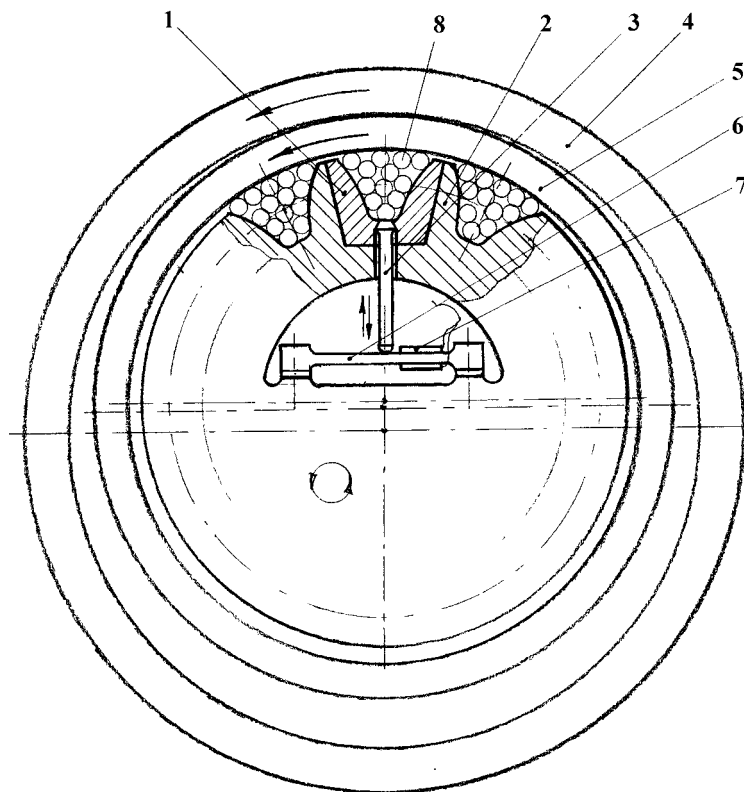


Рис. 2. Схема вимірювання сили деформування у западині зуба під час ВВЗК сталевими загартованими кульками

З метою перевірки теоретичних залежностей, що функціонально пов'язують силу деформування із технологічними параметрами ВВЗК, проведені експериментальні дослідження за методикою повного факторного експерименту типу 2^3 .

Заміри сили деформування проводили за схемою, зображеною на рис. 2, по чергово проводячи їх у днищі западини зуба, радіусному переході в ніжку зуба, на ділянці ділильного кола та на вершині зуба. Для більшої достовірності проведених замірів експеримент дублювали, використовуючи по чергово електротензометрію із осцилографною реєстрацією сигналів та комплект контрольно-вимірної апаратури для зняття і опрацювання віброграм.

Дослідження проводили як в умовах сухого тертя без мащення, так і при неперервній подачі у досліджувану западину зуба оливи "славол" М-3042у ТУ 13932946.015-96 із витратком $1 \div 1,5$ мл/с.

Як деформівні тіла використовували сталеві загартовані кульки діаметром $D = 2$ мм, які вільно розміщали у досліджуваній западині зуба (рис. 2), або розміщені у сепараторі підпружинені деформівні елементи, твердість матеріалу яких становила HRC₀ $55 \div 58$ і перевищувала твердість матеріалу зубчастого колеса. Конфігурація ударної частини деформівного елемента відповідала фрагменту профілю западини зуба на тій чи іншій досліджуваній її поверхні.

Кодування змінних технологічних параметрів (факторів) експерименту, рівні їх варіювання відображено у таблиці.

Рівні варіювання факторів для плану ПФЕ типу 2^3 дослідження сили деформування

№ з/п	Характеристика фактора	Кодове позначення	Рівні варіювання		Інтервал Варіювання
			Нижній	Верхній	
1.	Маса обкатного елемента m , кг	X_1	3	8	5
2.	Ексцентриситет обкатного елемента ε , мм	X_2	5	20	15
3.	Частота коливань f , Гц	X_3	17	50	33

Дійсні значення величини сили деформування у напрямку нормалі до оброблюваної бокової поверхні зуба, що діє у точці прикладання ударного імпульсу, визначали за формулою

$$P_n = \mu_R U_R,$$

де P_n – складова сили деформування по нормалі до оброблюваної поверхні; μ_R – чутливість акселометричного динамометра у напрямку до оброблюваної поверхні; U_R – переміщення проміжного стрижня, яке фіксують за допомогою вібровимірювального комплексу.

Тарування контактного динамометра здійснювали за величиною сили співударяння ударного копра із поверхнею тензочутливої балочки через сферичний індентор. Чутливість акселометричного динамометра у напрямку нормалі до оброблюваної поверхні визначали за формулою

$$\mu_R = \frac{R_{\text{тар.}}}{U_{R_{\text{тар.}}}},$$

де $U_{R_{\text{тар.}}}$ – переміщення тензочутливої балочки під дією сили співударяння ударного копра з її поверхнею через сферичний індентор, зафіксоване вібровимірювальним комплексом; $R_{\text{тар.}}$ – сила удару копра.

Віброграми для визначення тарувальної величини контактного зусилля опрацьовували за допомогою відповідної програми.

Експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів процесу ВВЗК на силу деформування проводили на лабораторних вібромашинах ЛВМ-1 і ЛВМ-2 за таким алгоритмом:

1. Динамічне тарування тензочутливих балочок.
 2. Закріплення дослідного зразка-фрагмента зубчастого колеса у колесі-матриці, встановлення проміжного стрижня на тензочутливій балочці, фіксація давачів опору або вібродавача.
 3. Розміщення колеса-матриці у закріпленому на вібромашині зміцнювачі, під'єднання комплексу контрольно-вимірної апаратури.
 4. Встановлення обумовлених експериментом значень технологічних досліджуваних параметрів зміцнювача – маси та ексцентриситету обкатника, частоти коливань.
 5. Вмикання приводу вібромашини та оливної помпи (у разі потреби), вихід на стабільний усталений режим роботи зміцнювача.
 6. Вмикання комплексу контрольно-вимірної апаратури і зняття показів (зчитування за допомогою вимірної апаратури, звукової карти комп'ютера та програми Sound Forge сигналу з вібродавача впродовж 5 с, запис його у Wav-файл).
 7. Побудова віброграм переміщень тензочутливої балочки на підставі аналізу та опрацювання отриманих результатів.
 8. Визначення дійсних значень сили деформування в напрямку нормалі до досліджуваної ділянки бокової поверхні зуба, опрацювання, аналіз та оцінка одержаних результатів.
 9. Зміна значень одного із досліджуваних технологічних параметрів процесу відповідно до план-матриці експерименту, повторення п. 4 ÷ 8 алгоритму.
- Після обробки результатів експериментального дослідження за вищевказаною методикою, перевірки однорідності дисперсій відтворюваності у досліджах за критерієм Кохрена, значущості коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Ст'юдента та адекватності математичних моделей при використанні критерію Фішера в кінцевому рівнянні регресії, що відображають вплив технологічних параметрів процесу ВВЗК на силу деформування матеріалу бокової поверхні зуба, матимуть вигляд у кодовому відображенні факторів:

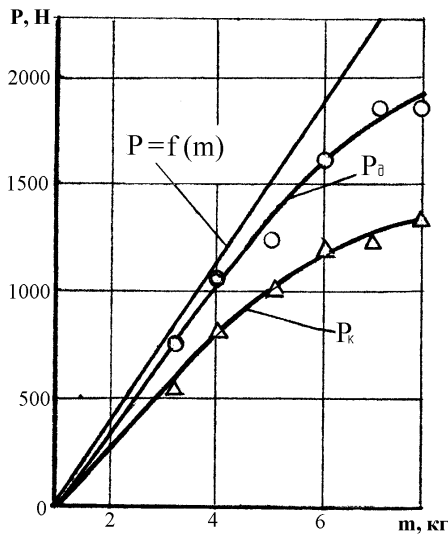
$$Y_{P\partial} = 7,417 + 0,491X_1 + 0,693X_2 + 1,079X_3, \quad (3)$$

в натуральних показниках технологічних параметрів процесу:

$$P_{\partial} = e^{-3,2018} \cdot M^{1,002} \cdot \varepsilon^{0,998} \cdot f^{1,996}. \quad (4)$$

Результати характеру уособленого впливу технологічних параметрів процесу ВВЗК та їх взаємовпливів на зміну сили деформування відображено на графіках (рис. 3, 4).

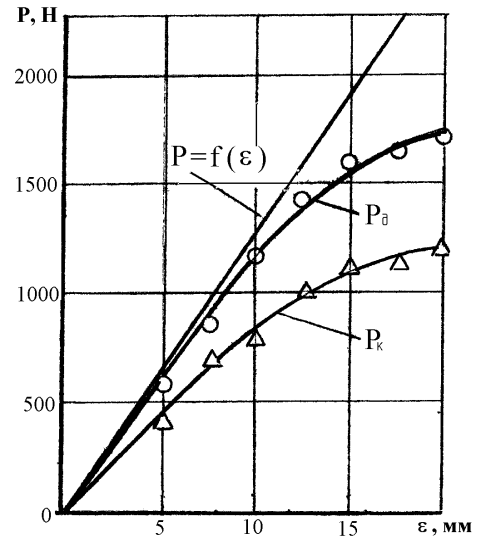
Аналіз рівнянь регресії та графічних відображень залежностей свідчить, що сила деформування пропорційна обраним технологічним параметрам, причому характер впливу маси та ексцентриситету обкатника наближений до прямо пропорційної, а частоти коливань – до квадратичної залежності. Це підтверджує домінантність впливу частоти коливань привідного тіла, в даному випадку зміцнюваного зубчастого колеса, яка дорівнює частоті обкочувального руху обкатника, над масою та ексцентриситетом обкатника у розвитку сили деформування.



а

Умови експерименту:

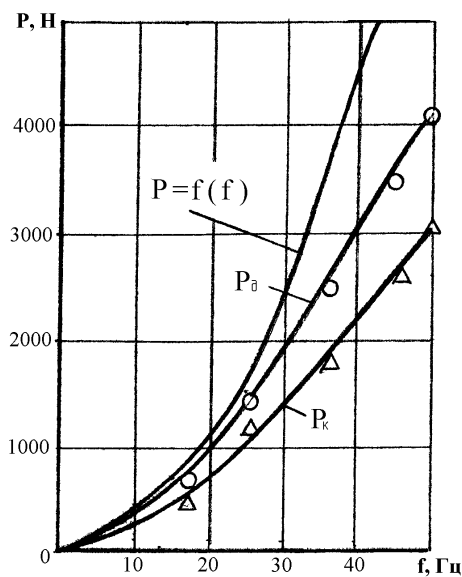
- ексцентриситет обкатника $\varepsilon = 12,5$ мм;
- частота коливань $f = 24$ Гц



б

Умови експерименту:

- маса обкатника $m = 5,5$ кг;
- частота коливань $f = 24$ Гц

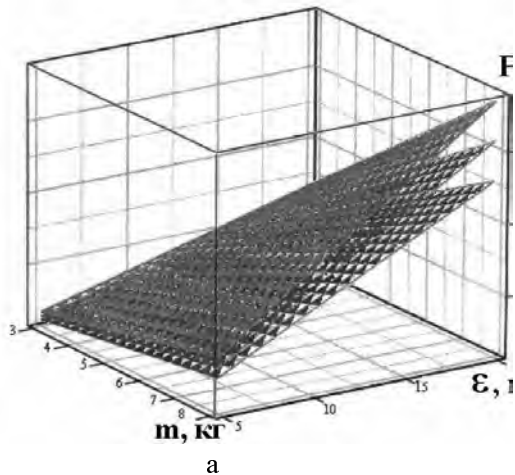


в

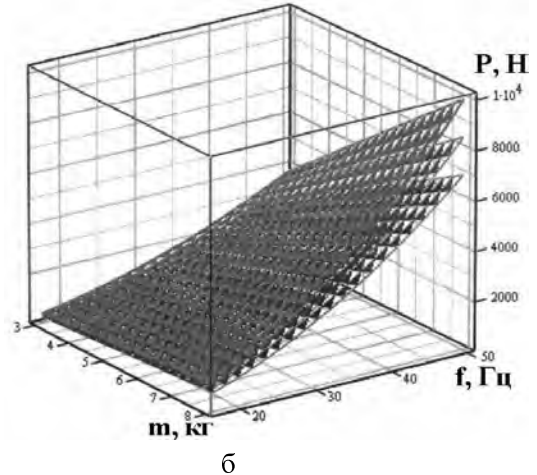
Умови експерименту:

- маса обкатника $m = 5,5$ кг;
- ексцентриситет обкатника $\varepsilon = 12,5$ мм

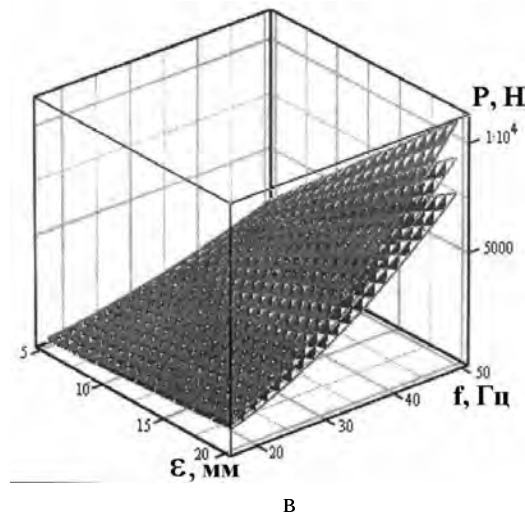
Рис. 3. Залежність сили деформування матеріалу бокової поверхні зуба від технологічних параметрів процесу ВВЗК: а – маси обкатника; б – ексцентриситету обкатника; в – частоти коливань зубчастого колеса. $P = f(m, \varepsilon, f)$ – теоретично встановлена залежність сили деформування від технологічних параметрів ВВЗК; P_δ, P_κ – сила деформування, що за даних конструктивних параметрів зміцнювача забезпечується відповідно деформівними елементами (P_δ) та сталевими кульками (P_κ)



Умови експерименту: частота коливань
 $f = 24$ Гц



Умови експерименту: ексцентриситет
обкатника $\varepsilon = 12,5$ мм



Умови експерименту: маса обкатника
 $m = 5,5$ кг

Рис. 4. Взаємовплив конструктивних параметрів зміцнювача на силу деформування в процесі ВВЗК: а – маси та ексцентриситету обкатника; б – маси обкатника та частоти коливань; в – ексцентриситету обкатника та частоти коливань

Поряд з тим для всіх технологічних параметрів і їх змін спостерігаються певні закономірності, зокрема:

- експериментально визначена сила деформування менша теоретичного розрахункового значення, що обумовлено, очевидно, втратою певної частки енергії, а отже, і сили деформування, на подолання сил тертя між деформівними тілами та матеріалом бокової поверхні зуба, що супроводжується підвищенням їх температури;

- по мірі зростання значень будь-якого із технологічних параметрів, особливо при наближенні до верхньої межі діапазону варіювання, інтенсивність впливу технологічних параметрів на зростання сили деформування зменшується, тобто спостерігається тенденція до обмеження реальних значень сили деформування певною верхньою межею, певним максимумом. Особливо це помітно на графіку впливу частоти коливань на силу

деформування, де по мірі наближення до 50 Гц експериментально зафіксовані значення сили деформування стабілізуються, тобто зростання сили практично не відбувається, бо все більша її частка поглинається на нагрівання контактуючих тіл. Це дає підставу рекомендувати для реальних промислових віброзміцнювачів зубчастих коліс середні із досліджуваного діапазону значення технологічних параметрів:

– ексцентриситет обкатника $\varepsilon = (2 \div 2,5)m_n$, де m_n – нормальний модуль зміцнюваного зубчастого колеса;

– частота коливань привідного тіла - $f = (24 \div 33)$ Гц.

Це суттєво зменшує динамічні навантаження на вузли і деталі зміцнювача, підвищує його надійність та довговічність.

Аналіз результатів експериментального дослідження впливу технологічних параметрів процесу ВВЗК на силу деформування, математичного та графічного їх відображення дає підставу для певних узагальнень та висновків. Так, зокрема, експериментально підтверджено дані теоретичного дослідження (див. залежність (1)), що сила деформування як у разі застосування сталевих кульок, так і за використання деформівних елементів пропорційна масі, ексцентриситету та частоті обкочування обкатника і зростає при їх збільшенні. Як випливає з наведених за результатами дослідження графіків (рис. 3) розбіжність даних теоретичного та експериментального дослідження зміни сили деформування не перевищує $10 \div 12\%$, що дає підставу рекомендувати математичні залежності (3) та (4) для інженерних розрахунків.

У випадку застосування деформівних елементів найбільші значення сили деформування ($P_D = 2000 \div 2100$ Н) зафіксовано у радіусному переході в ніжку зуба та на днищі западини, проміжні ($P_D = 1800 \div 1850$ Н) – на вершині зуба і найменші ($P_D = 1600 \div 1650$ Н) - на ділянці ділильного кола (рис. 5, б). Розбіжність значень при цьому менша, ніж при зміцненні кульками (рис. 5, а), та все ж доволі суттєва і сягає 15 – 20 %. У даному випадку це зумовлено, очевидно, тим що матеріал радіусного переходу у ніжку зуба та днища западини сприймає всю за абсолютною величиною силу деформування, що скерована радіально до геометричної осі зубчастого колеса і по нормалі до зміцнюваної поверхні. На вершині ж зуба, а тим паче на ділянці ділильного кола матеріал криволінійної поверхні зуба, а відповідно і проміжний стрижень акселометричного динамометра, сприймають лише частку сили деформування, що спрямована по нормалі до бокової поверхні зуба. Певна і доволі вагома (до $30 \div 35\%$) частка сили деформування, у цьому випадку, втрачається на подолання скерованих по дотичній сил тертя ковзання між матеріалами зуба та деформівного елемента.

Суттєво даються взнаки на величині сили деформування, що сприймається матеріалом бокової поверхні зубів, і умови зміцнення. Так, при зміцненні без мащення в умовах сухого тертя внаслідок втрат енергії на подолання тертя кульок між собою, кульок чи деформівних елементів із оброблюваною поверхнею сила деформування зменшується в середньому на 20 – 25 %. Як наслідок, до 50 – 70 °С підвищується температура контактуючих тіл на ділянці зміцнення, на що витрачається значна частка енергії деформування. Це властиво як зміцнювальній обробці кульками, так і деформівними елементами.

За наявності мастила втрати енергії на тертя різко зменшуються, що забезпечує зростання сили деформування. При цьому, суттєву роль відіграють і властивості застосовуваних мастил – чим менша їх в'язкість і кращі мастильні властивості, тим менші втрати енергії і сили деформування. Так, використання для мащення п'ятипроцентного водного розчину кальцинованої соди, що доволі широко застосовується в процесах віброоброблювання, лише на 10 – 12 % підвищує значення сприйнятої матеріалом сили деформування, а індустрічної оливи та оливи “славол” М-3042у – на 15 – 20 %.

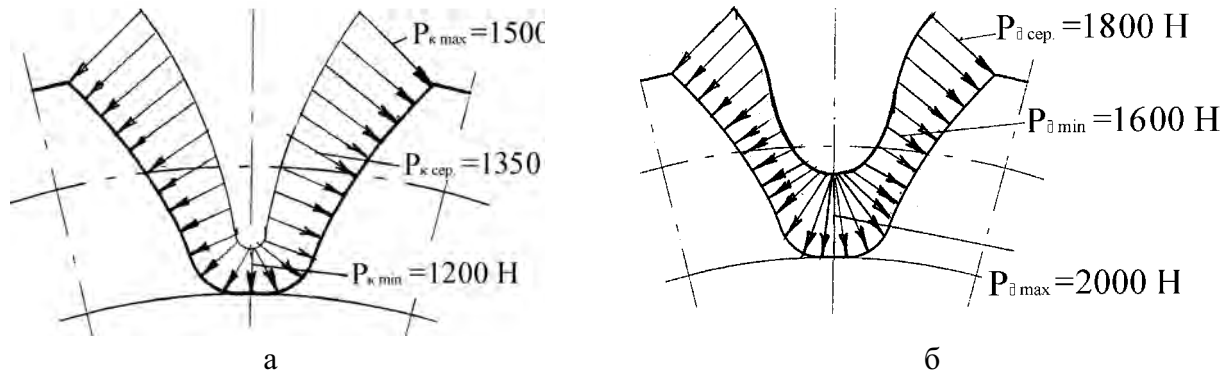


Рис. 5. Епюри розподілу сили деформування по довжині твірної бокової поверхні зуба у випадку зміцнення: а – сталевими загартованими кульками; б – деформівними елементами

Отже, у результаті експерименту, по-перше, визначено вплив конструктивних параметрів зміцнювача на силу деформування в процесі ВВЗК, по-друге, експериментально перевірено і підтверджено дані теоретичного дослідження процесу стосовно сили деформування, по-третє, виявлено характер розподілу сили деформування по довжині твірної зміцнюваної бокової поверхні зуба, по-четверте, встановлено вплив умов зміцнення – типу деформівних тіл (кульки чи деформівні елементи) та наявності мастила на характер змін сприйнятої матеріалом зуба сили деформування.

1. Афтаназів І.С., Клименко О.Д. Аналіз і перспективи застосування ППД для підвищення надійності зубчастих коліс силових передач. Вісн. технологічн. ун-ту Поділля. Ч. 3. – Хмельницький, 2002. – С. 131 – 137. 2. Афтаназів І.С., Клименко О.Д. Підвищення надійності зубчастих коліс вібраційно-відцентровим зміцнювальним оброблюванням // Вісн. НТУУ «Київський політехнічний інститут». – К., 2002. – С. 74 – 77.