

УДК 62-752

Ю.А. Невдаха, доц., канд. техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук,
А. Ю. Невдаха, асист.

Кіровоградський національний технічний університет

До руйнування зубців зубчастих коліс

В статті проведено конкретизацію і доповнення загальних відомостей за основними видами руйнування зубчастих коліс, рекомендовані заходи запобігання поломки зубців.

зубець, викришування, деформація, руйнування, робоча поверхня, напруження згину, мікротріщини

В машинобудуванні, сільськогосподарській промисловості та інших галузях народного господарства широко застосовуються механічні зубчасті передачі. Вірно спроектована і виготовлена передача при виконанні всіх правил її експлуатації не повинна перегріватися та шуміти. Поява значного перегрівання і надмірного шуму свідчить про недоліки в роботі передачі, пов'язані з її конструкцією, виготовленням, неправильним вибором змащувального матеріалу або можливим пошкодженням зубців. Практика експлуатації зубчастих передач показує, що найбільш характерними видами руйнувань зубців є такі: поломка зубців, викришування робочих поверхонь зубців, знос зубців, пластичні деформації, заїдання та відшарування поверхневих шарів зубців. Ці види руйнування зубців розглянуті в [1], [2], [3]. Передчасний вихід з ладу зубчастих коліс ускладнює експлуатацію багатьох машин, збільшує експлуатаційні витрати, а в деяких випадках може привести до аварії з серйозними наслідками.

Поломка зубців внаслідок своєї раптовості є небезпечним видом руйнування. У більшості випадків поломка зубців носить втомний характер. Якщо напруження згину, періодично виникають при входженні зуба в зачеплення перевищують межу витривалості, то в місцях переходу зубців в обід (зона максимальної концентрації напружень) з'являються мікротріщини, що поширюються при повторних циклах навантаження всередину тіла зуба по нормалі до його поверхні (рис. 1).

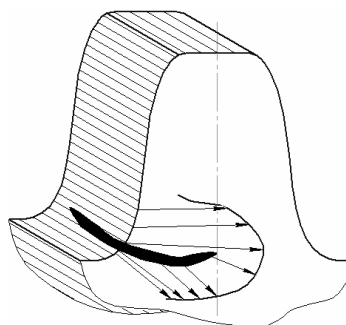


Рисунок 1 – Утворення втомної тріщини

Це явище найбільш часто зустрічається у передачах з чавунними зубчастими колесами, а також зі сталевими колесами, які мають високу твердість робочих поверхонь зубців $HВ > 350$.

Причинами поломок зубців можуть бути виникаючі в процесі експлуатації нерівномірності розподілу навантаження по ширині зубчатого вінця через перекіс осей, викликаного надмірним збільшенням люфтів в підшипниках і в шліцьових з'єднаннях, а також різного роду виробничих дефектів (раковини при відливанні деталей, тріщини при термообробці і т. п.). При відносно невеликій товщині зуба по колу виступів менше $(0,3...0,4)m$ може відбуватися викришування вершин зуба. На цей випадок необхідно звертати увагу при виборі коефіцієнтів корекції.

На колесах з косими та шевронними зубцями, тріщина розвивається з торцевої поверхні колеса в основі зубця і розповсюджується похило по довжині зубця до його вершини (рис.2). Внаслідок чого виламується частина зуба.



Рисунок 2 – Приклад поломки зуба косозубого колеса

Зменшення можливості поломок зубців досягається збільшенням міцності основи зуба, зменшенням концентрації напружень, збільшенням точності виготовлення і монтажу передачі та підвищенням механічних властивостей матеріалу зубчастих коліс. **Викришування робочих поверхонь зубців** – найбільш розповсюджений вид руйнування зубців закритих передач, працюючих з підвищеним змащуванням і надійно захищених від попадання бруду і абразивних частинок.

Зобразимо складові векторів колових швидкостей точки зачеплення K (рис. 3), яка належить зубцям першого і другого коліс.

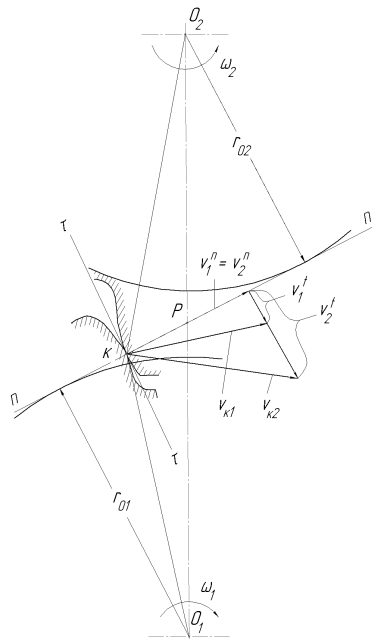


Рисунок 3 – Визначення випереджаючої поверхні

Як відомо із основного закону зачеплення, $V_1^n = V_2^n$, і якщо точка дотикання зубців не співпадає з полюсом зачеплення P , то $V_1^\tau \neq V_2^\tau$. Із побудови видно, що $V_2^\tau > V_1^\tau$, тобто поверхня ніжки зуба являється випереджаючою поверхнею, і саме тому ямки викришування з'являються на поверхні ніжок зубців і, як правило, відсутні на поверхні головок зубців рис. 4.

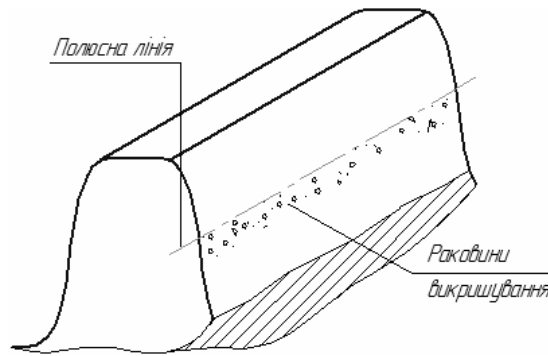


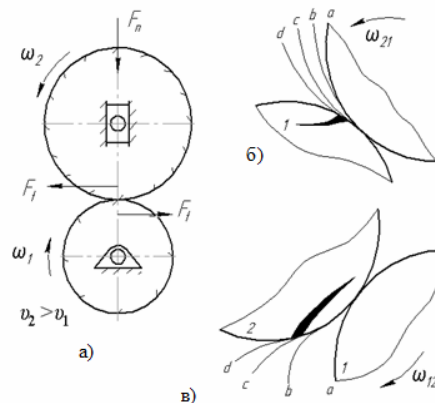
Рисунок 4 – Викришування на поверхні ніжок зубців

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при швидкостях ковзання $V_S \leq 0.1$ м/с коефіцієнт тертя досягає максимальної величини і при цьому спостерігається мінімальний опір викришуванню. В зубчастих передачах при середніх і високих кутових швидкостях зона з указаною величиною швидкості ковзання знаходяться на відстані $(0.1 \dots 0.4) \cdot m$ від полюсної лінії, тому викришування спочатку виникає на ніжка зубців поблизу полюсної лінії.

Одним з факторів, що сприяють інтенсивному розвитку втомних тріщин є наявність мастила. В тих випадках, коли відносне кочення дотичних поверхонь супроводжується ковзанням, втомні тріщини, що виникають на поверхнях, під впливом сил тертя орієнтуються по-різному для обох поверхонь. Положення втомних тріщин визначається напрямом сили тертя, прикладеної до даної поверхні. Слід зазначити, що похиле розташування втомних тріщин спостерігається також у крихких матеріалах, які набувають пластичних властивостей завдяки сильному всебічному стиску матеріалу в зоні контакту.

На рис. 5а наведено два котки, притиснуті один до одного силою F_n і мають різні, за величиною, колові швидкості на поверхні контакту. Припустимо, що колова швидкість другого котка більша, ніж колова швидкість першого. При цьому, крім перекошування котків, матиме місце і відносне ковзання, швидкість якого може бути визначена як різниця колових швидкостей котків. При прийнятому співвідношенні колових швидкостей поверхня першого котка буде відстаючою, а поверхня другого котка – випереджаючою. На рис. 5а показано напрям початкових втомних тріщин, орієнтованих по-різному у відстаючій та випереджаючій поверхонь. На випереджаючій поверхні втомні тріщини орієнтовані таким чином, що в зону дії контактних напружень першим потрапляє під поверхневий кінець тріщини. Внаслідок цього, при подальшому відносному переміщенні поверхонь, проміжні положення яких відзначені на рис. 5в літерами а, б, с і d, мастило з тріщин видавлюється і тріщина рости не буде. Втомні тріщини на відстаючій поверхні рис. 5б розташовані таким чином, що в зону найбільший тисків вони підходять своїм відкритим, поверхневим кінцем. При подальшому відносному русі мастило нагнітається в тріщину, тиск в шарі масла, що

знаходиться всередині тріщини, різко зростає, що створює розклинюючу дію, яка сприяє поступовому розвитку тріщини і призводить в результаті до виламування частинки металу.



а) загальний вид передачі; б) розвиток втомних тріщин на відстаючій поверхні; в) розвиток втомних тріщин на випереджаючій поверхні

Рисунок 5 – Вплив змащування на розвиток втомних тріщин:

Таким чином, наявність мастила сприяє появі процесу викришування робочих поверхонь. Значний вплив на величину опору викришування чинить в'язкість мастила: зі збільшенням в'язкості зростає навантажувальна здібність передачі, так як зменшується коефіцієнт тертя між контактуючими поверхнями; крім того, в більшому об'ємі мастила розвивається надмірних тиск, який сприяє зниженню контактних напружень. Сорт мастила чинить вплив на величину коефіцієнта тертя; спосіб подачі мастила змінює контактну витривалість робочих поверхонь зубців. Зі зменшенням кількості мастила до величини достатньої для попередження заїдання і недопущення перегріву передачі, збільшується опір викришування, так як при цьому підвищується спрацювання робочих поверхонь, ускладнюється розвиток втомних тріщин. Руїнування зубців від стирання випереджає їх руїнування від розвитку втомних тріщин при наявності абразивних частинок або недостатньому змащуванні, що і пояснює відсутність викришування у відкритих передачах.

Знос зубців полягає в стиранні робочих поверхонь зубців характерний для відкритих передач, в яких колеса не захищені від попадання абразивних часток. Стирання поверхонь буде тим більше, чим більша величина питомого ковзання зубців, тому ніжки піддаються найбільшому зносу (рис. 6).

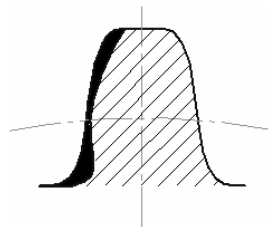


Рисунок 6 – Розподіл зносу по висоті зуба

Мінімальним стирання буде в полюсі зачеплення, оскільки в ньому відсутнє ковзання профілів. Внаслідок нерівномірності зносу спотворюється евольвентний профіль зуба, зростають динамічні навантаження, ослабляються ніжки зуба. Усе це веде до зростання напруження в основі зуба, зниженню згінної міцності і може привести до поломки зуба. Знос зубців можна зменшити застосовуючи зубчасті колеса

з високою твердістю робочих поверхонь, правильним підбором мастила та вирівнюванням величини питомого ковзання за допомогою корекції зубчастих коліс.

Пластичні деформації (зсуви) спостерігаються у важко навантажених тихохідних зубчастих колесах, виготовлених з м'якої сталі. При високих контактних напруженнях пластичні деформації можуть досягти значних розмірів і сили тертя викликають великі переміщення часток поверхневих шарів у напрямі ковзання. В результаті, на поверхні ведучих зубців уздовж полюсної лінії утворюється западина (рис. 7, а) на поверхні ведених зубців – хребет.

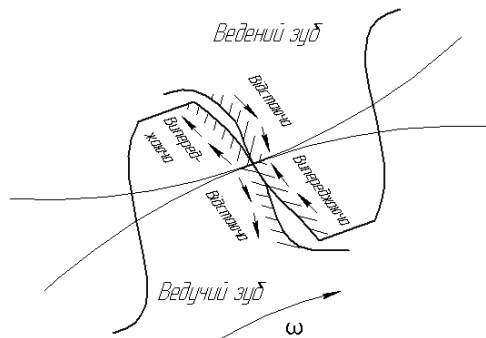


Рисунок 7 – Пластичні деформації робочих поверхонь зубців

Пластичні деформації можна усунути з підвищенням в'язкості мастила, оскільки при цьому зменшується коефіцієнт тертя, та з підвищенням твердості робочих поверхонь зубців.

Заїдання (зчеплення) полягає в тому, що при наявності ковзання і відсутності умов, що забезпечують неперервну масляну плівку між робочими поверхнями, частинки більш м'якого матеріалу міцно зчіплюються з частинками матеріалу другої поверхні, відриваються від першої і при подальшому русі утворюють борозни на більш м'якій поверхні. Напрямок цих борозен або «задирів» співпадає з напрямком відносної швидкості руху робочих поверхонь.

При наявності великих тисків між дотичними поверхнями, руйнування масляної плівки і пов'язане з ним заїдання, може відбутися або при високих швидкостях, внаслідок підвищення температури в зоні контакту і втрати в'язкості масла, або при малих швидкостях, коли відсутні умови для утворення масляного клину.

Викришування, що з'являється на робочих поверхнях кінематичних пар сприяють виникненню заїдання, так як при цьому зменшується поверхня дотику, що призводить до зростання напружень в зоні контакту. При цьому, також зростають сили тертя у зв'язку з тим, що мастило вижимается в утворені при викришуванні ямки (рис. 8).

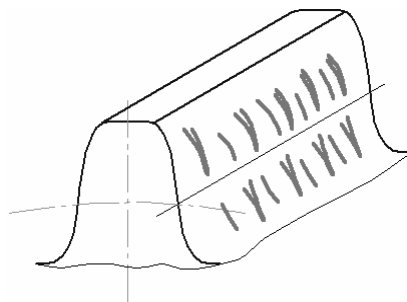


Рисунок 8 – Сліди заїдання на робочій поверхні зуба

Зменшення можливості виникнення заїдання досягається зниженням максимальної швидкості ковзання робочих поверхонь (за допомогою кутової корекції або збільшення числа зубців при заданих розмірах передачі), збільшенням твердості робочих поверхонь зубців, підвищенням в'язкості мастила і вживанням поверхнево-активних (противозадирних) мастил, що містять присадки з сірки.

Відшарування, цей вид руйнування найнебезпечніший для коліс, зубці яких мають поверхневе зміцнення (азотування, цементування, гартування і т.п.). Відшаруванню сприяє дія підвищених навантажень на зубці. Відшарування поверхневих шарів зубців спостерігається у тих випадках, коли під зміцненим поверхневим шаром зубців зведені контактні напруження достатньо великі. Через періодичну дію глибинних напружень під зміцненим шаром матеріалу можуть виникнути втомні тріщини, розвиток яких спричинює відшарування окремих ділянок поверхневого зміцненого шару.

Щоб запобігти відшаруванню поверхневих шарів зубців, треба забезпечити відповідну товщину зміцненого шару та достатню міцність серцевини зубця.

Висновок. У цій статті розглянуто лише найбільш поширені види руйнувань, що носять загальний характер для всіх механізмів. Вірно спроектовані передачі повинні бути розраховані так, щоб будь-яка з можливих причин пошкодження зубців була виключена. Згідно з цим перевіряють витривалість робочих поверхонь (розрахунок на контактну міцність і міцність на згин). Загальноприйнятої методики розрахунку зубців на зношування і заїдання в даний час немає. Відкриті передачі розраховуються на згин, закриті – на контактну міцність і на згин.

Список літератури

1. Павлище В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: Підручник. – К.: Вища школа, 1993. – 556 с.
2. Иванов М.Н. Детали машин: Учебник для машиностр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1984. – 336 с.
3. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для машиностроительных и механических спец. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.: ил.

Ю.Невдаха, В.Пукалов, А. Невдаха

К разрушению зубьев зубчатых колес

В статье приведена конкретизация и дополнение общих сведений по основным видам разрушения зубчатых колес, рекомендованы меры предотвращения поломок зубьев.

Iu. Nevdakha, V. Pukalov, A. Nevdakha

To destruction of the teeth's breakage cogwheels

The article contains specify and addition of the general information by the main types of cogwheels destruction, also it has recommendation of the measures for prevent teeth's breakage.

Одержано 02.02.12