

Є.К. ПОСВЯТЕНКО, д-р техн. наук, профессор, НТУ, Киев;
Н.И. ПОСВЯТЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ, Киев;
Р.В. БУДЯК, ассистент, ВГАУ, Винница

К РАСЧЕТУ ПРОТЯЖНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ГИЛЬЗ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

Робочі поверхні протягування піддаються механічному зношуванню: абразивному, адгезійному та адгезійно-утомному. Всі ці види зносу безпосередньо залежать від величини контактного тиску, особливо від градієнту напружень. Головним напрямом посилення опору зносу і довговічності інструменту є придання робочим поверхням криволінійної форми. Це різко зменшує кривизну епюри контактного тиску. Ще одним напрямом посилення опору зносу є використання утворення налипень.

Рабочие поверхности протягивания подвержены механическому изнашиванию: абразивному, адгезионному и адгезионно-усталостному. Все эти виды износа непосредственно зависят от величины контактного давления, в особенности от градиента напряжений. Основным направлением увеличения сопротивления износу и долговечности инструмента является придание рабочим поверхностям криволинейной формы. Это резко уменьшает кривизну эпюры контактного давления. Еще одним направлением увеличения сопротивления износу является использование наростообразования.

Working surfaces pulling are exposed to mechanical deterioration: abrasive, adhesive and adhesive - fatigue. All these kinds of deterioration strongly depend on size of contact pressure, is especial from their gradient curve. A mainstream of increase of wear resistance and durability tool is giving to working surfaces of the curvilinear form. It sharply lowers curvature of the schedule of contact pressure. One more direction of increase of wear resistance tool is use outgrowth.

Актуальность проблемы, состояние вопроса и цель исследования.

Наши исследования [1–4] показали, что ресурсосберегающий процесс обработки глубоких отверстий в гильзах гидроцилиндров, изготавливаемых из трубного проката, целесообразно строить по схеме «комбинированное протягивание – раскатка роликовым инструментом». Однако, при разработке протяжного инструмента нужно решить несколько еще недостаточно исследованных проблем, связанных в конечном счете с надежностью изделия, в частности: снижение негативного влияния на прямолинейность отверстия «пластического шарнира», повышение прочности и стойкости рабочих элементов протяжек, уменьшение уровня вибраций инструмента при обработке гильзы, повышение радиальной жесткости последней технологическими методами, а также разработку программы расчета комбинированного инструмента.

Деформирующе-режущее протягивание – один из наиболее эффективных технологических процессов обработки отверстий, в частности глубоких. Отличительными особенностями этого процесса являются низкие скорости обработки (до 10 м/мин), высокая производительность,

обуславливаемая одновременным участием в работе порядка 5 – 15 деформирующих элементов и зубьев с общей длиной их контакта с изделием до 3000 мм, что на четыре порядка выше такого контакта при точении, а также использование сложного дорогостоящего инструмента из современных инструментальных материалов. Последнее обстоятельство требует дополнительного углубленного исследования износа, стойкости и прочности деформирующе-режущих протяжек, поскольку в известных работах принимались ряд допущений, искажавших общую картину этих явлений.

Результаты исследования. При низких и средних скоростях резания, когда диффузионные процессы вследствие невысоких температур в зоне контакта (до 500 °С) маловероятны, причиной изнашивания передней и задней поверхностей инструмента являются интегрально протекающие процессы абразивного, адгезионного и адгезионно-усталостного видов износа. Наши исследования показали, что это справедливо как для зубьев, так и для деформирующих элементов (ДЭ), изготовленных из широкого спектра инструментальных материалов, в частности, твердого сплава марки ВК15 и быстрорежущих или легированных сталей марок Р6М5 и ХВГ, как типичных при изготовлении комбинированных протяжек. Интенсивность названных видов механического износа зависит от контактного давления. Процесс внедрения абразивной частички обрабатываемого материала или технологической среды карбидного, оксидного, нитридного или другого подобного происхождения в инструментальный материал с последующим перемещением («царапанием») стабильно протекает в том случае, когда величина нормальных напряжений (контактного давления) примерно втрое превышает предел текучести σ_T материала, на который наносится царапина. Работа единичной абразивной частицы может быть смоделирована коническим индентированием, при котором при угле конуса $2\beta = 170^\circ$ указанное превышение, обуславливающее начало внедрения, равно $A_k = 2,77$ [5]. Приняв во внимание сказанное, получим значение силы P , как равнодействующей проекции нормальных напряжений в момент завершения внедрения абразивной частички в инструментальный материал на единичную площадку S :

$$P = A_k \cdot \sigma_T \cdot S \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (1)$$

На адгезионную составляющую изнашивания также оказывают сильное влияние нормальные напряжения. Однако механизм износа здесь определяют мостики схватывания, которые возникают при сближении контактирующей пары, когда давление превысит предел упругости одного или обоих материалов. Это содействует началу пластической деформации, приводящей к возрастанию площади мостика схватывания, повышению его несущей способности и, следовательно, к возрастанию интенсивности адгезионного износа. Визуально или при небольшом увеличении этот вид износа хорошо идентифицируется, поскольку при его протекании весьма велика

интенсивность возникновения и разрушения мостиков схватывания. На изношенных площадках зубьев хорошо видны «оспинки» адгезии, которые отчетливо отличаются от абразивных «бороздок». Известно [6], что на один метр пути резания каждая точка контакта подвергается тысячекратному воздействию срезающих напряжений. Такое воздействие приводит к усталости локальных объемов инструментального материала и их последующему разрушению, т.е. возникает третья составляющая механического износа при комбинированном протягивании – адгезионно-усталостная.

Таким образом, контактное давление является главным фактором, определяющим интенсивность изнашивания протяжного инструмента, причем, чем это давление выше, тем ниже будет стойкость последнего. Однако, изучение топографии площадок изношенных ДЭ и зубьев приводит к выводу, что, поскольку интенсивность износа различна по площади контакта, то и контактные давления были неравномерными по этой площади. Наши исследования показали, что эпюра нормальных напряжений на передней поверхности режущей части и рабочего конуса деформирующей части является высокоградиентной, т.е. значение контактного давления могут отличаться вдоль эпюры в 2–10 раз и достигать значения 4 ГПа. Этим и объясняется различная степень изнашивания вдоль площади контакта, которая после определенного времени работы протяжки приобретает форму поверхности, описываемой плоскими кривыми второго порядка типа спирали, конхоиды, эвольвенты, циклоиды. Отсюда вытекает логический вывод о придании, с целью снижения градиента эпюры контактного давления и, как следствие, повышения износостойкости инструмента, его рабочим поверхностям такой криволинейной формы, которую имеет эпюра давлений при плоской рабочей поверхности [7].

Для ДЭ авторами была проведена специальная часть исследования, в процессе которого было установлено следующее. Изучение топографии износа ДЭ после 5–10 тысяч метров пути протягивания и специфики разрушения от напряжений изгиба свидетельствуют о сложном характере эпюры распределения контактных давлений даже в тяжелых условиях обработки. Так, поперечное сечение, по которому происходит разрушение ДЭ, как правило, проходит через поверхность рабочего конуса вблизи границы с цилиндрической ленточкой. Там же находится и место («поясок») наибольшего износа после продолжительной работы инструмента. Другой такой «поясок» размещен вблизи начала поверхности контакта. Разработанная нами методика определения нормальных контактных давлений [8] позволила определить характер их распределения в зависимости от условий протягивания. Эксперименты были проведены на втулках из стали 20 и 20Г, а также из алюминиевого сплава АК6 с исходным диаметром отверстия $d_0 = 45$ мм и толщиной стенки $t_0 = 2–10$ мм при натяге $a = 0,4–$

1,6 мм и скорости протягивания $v = 3$ м/мин. Для обеспечения минимальной (критической) длины контакта соблюдалось условие:

$$t_{0,sp} = 17,0 \cdot a^{0,77} \cdot d^{-0,242} . \quad (2)$$

На рис.1 дан пример распределения нормальных давлений по длине контакта для стали 20Г.

В результате их обработки были получены полиномы 5-ой степени вида:

$$\frac{g}{g_{max}} = \sum_{i=1}^5 B_i \left(\frac{l}{l_{\phi}} \right)^i , \quad (3)$$

где: g_{max} – максимальная величина нормальных контактных давлений для данной эшпюры; l – расстояние от начала контакта до точки, где определяется g/g_{max} ; l_{ϕ} – фактическая длина контакта; $B(i)$ – коэффициент регрессии при

$$\left(\frac{l}{l_{\phi}} \right)^i .$$

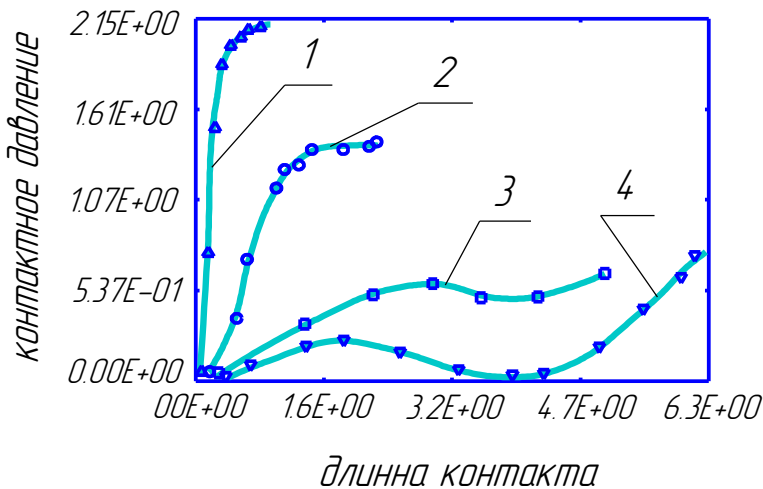


Рисунок 1 – Распределение нормальных давлений по длине контакта ДЭ с деталью из стали 20Г при протягивании втулки с диаметром отверстия 45 мм:

- 1 – $a = 0,4$ мм; $t_0 = 6$ мм; 2 – $a = 1$ мм; $t_0 = 6$ мм; 3 – $a = 1,6$ мм; $t_0 = 6$ мм; 4 – $a = 1,6$ мм; $t_0 = 4$ мм.

Коэффициенты $B(i)$, значимость которых оценивалась по t – критерию Стьюдента, определяются по зависимостям:

$$B_1 = -2,894 \ln \frac{2,239}{1 + \frac{t_0}{t_{0кр}}}; \quad (4)$$

$$B_2 = 41,68 - \frac{\left(\frac{t_0}{t_{0кр}}\right)^{3,2}}{1,588 \cdot 10^{-3} + 2,783 \cdot 10^{-2} \left(\frac{t_0}{t_{0кр}}\right)^{3,55}}; \quad (5)$$

$$B_3 = \frac{\left(\frac{t_0}{t_{0кр}}\right)^{3,57}}{4,187 \cdot 10^{-4} + 6,113 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_0}{t_{0кр}}\right)^4} - 163,2; \quad (6)$$

$$B_4 = 212,2 - \frac{\left(\frac{t_0}{t_{0кр}}\right)^{3,8}}{2,361 \cdot 10^{-4} + 4,475 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_0}{t_{0кр}}\right)^{4,2}}; \quad (7)$$

$$B_5 = \frac{\left(\frac{t_0}{t_{0кр}}\right)^{3,71}}{7,174 \cdot 10^{-4} + 9,899 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_0}{t_{0кр}}\right)^{4,12}}. \quad (8)$$

Для определения максимального контактного давления для зависимости (3) следует воспользоваться уравнением [9]:

$$g_{max} = \frac{P_k}{2 \cos \alpha_\phi l_\phi \pi \left[R_\phi - \sin \alpha_\phi l_\phi \sum_{i=1}^5 \frac{B_i}{i+1} + l_\phi \sin \alpha_\phi \sum_{i=1}^5 \frac{B_i}{i+2} \right]}. \quad (9)$$

Значение радиальной силы P_k для зависимости (9) вычисляется по уравнениям, приведенным в работе [10].

На рис.2 приведены типичные по характеру эпюры распределения нормальных контактных давлений для различных толщин стенок, натягов и обрабатываемых материалов. Эти данные, а также кривые, приведенные на рис.1, свидетельствуют о том, что характер эпюр обуславливается натягом и толщиной стенки детали. На величину нормальных давлений, наряду с этими факторами, влияют свойства обрабатываемого материала. При малых натягах

и больших толщинах стенки эпюра близка к прямоугольнику (рис.2, кривая 1). В этом случае в расчетах инструмента рабочую нагрузку допустимо принимать равномерно распределенной по длине контакта. Увеличение натяга при больших толщинах стенки приводит к приобретению эпюрой вида криволинейного треугольника (кривые 2 и 3), а уменьшение толщины стенки при больших натягах превращает эпюру в два криволинейных треугольника (кривая 4). В последнем случае кривая нормальных давлений имеет два максимума, первый из которых находится вблизи начала контакта, а другой – в точке перехода поверхности рабочего конуса в цилиндрическую ленточку. Минимум кривой находится примерно посередине длины контакта.

Значительно понизить градиент эпюры контактных давлений также можно, используя наростообразование [1, 11]. Нами установлено, что тело нароста при протягивании имеет практически стабильные формы и объём, подвергается лишь действию упругих деформаций и фактически является дополнительным режущим клином с собственными геометрическими параметрами, которые существенно отличаются от геометрических параметров инструмента, полученных при заточке. Нарост генерируется системой «инструмент–деталь» при адаптации последней к заданным условиям резания. Изучение многочисленных микрофотографий «корней» стружки показало, что внешняя граница тела нароста, контактирующая со стружкой, имеет форму плоской кривой типа конхоиды, спирали, эвольвенты, циклоиды. Это значительно выпрямляет эпюру контактных давлений и, как следствие, позволяет повысить износостойкость инструмента.

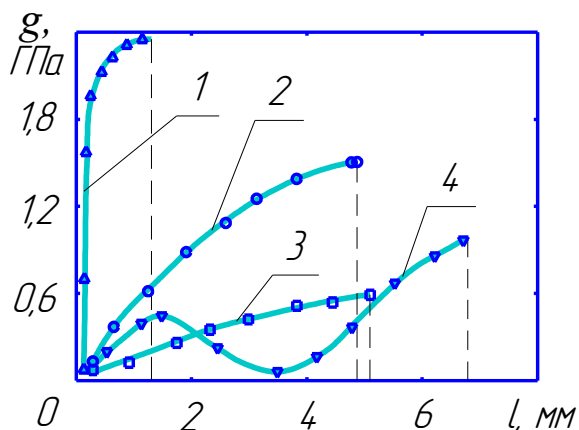


Рисунок 2 – Распределение нормальных давлений g по длине контакта l_{ϕ} ДЭ с деталью (диаметр отверстия 45 мм) при протягивании:

- 1 – сталь 20; $a = 0,4$ мм; $t_0 = 10$ мм; 2 – сталь 20; $a = 1,6$ мм; $t_0 = 10$ мм;
- 3 – сплав АК6; $a = 0,4$ мм; $t_0 = 6$ мм; 4 – сталь 20Г; $a = 1,6$ мм; $t_0 = 4$ мм.

Вывод. Износостойкость протяжного инструмента в значительной степени определяется контактным давлением. Существенно повысить её можно средствами спрямления эпюры этих давлений путем придания рабочей поверхности ДЭ и режущего клина формы кривой эпюры давлений или, используя наростообразование.

Список литературы: 1. *Посвятенко Е.К.* Дослідження процесу обробки гільз циліндрів гідросистем машин/ Е.К.Посвятенко, Р.В.Будяк // Вісник Національного транспортного університету. – К., 2009. – Вип. 19. – Ч.1. – С. 49–53. 2. *Посвятенко Е.К.* Основні напрямки синтезу ресурсозберігаючих процесів виготовлення гідроциліндрів машин/ Е.К.Посвятенко, Р.В.Будяк // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – Х., 2009. – Вип.2 (19). – С.128–134. 3. ХДЗ (Холодне деформаційне зміцнення) як пріоритет підвищення надійності гідроциліндрів для комунальної техніки / Р.В.Будяк, Ю.Б.Паладійчук, В.Г.Писаренко, Л.П.Серета // Зб. наук. пр. Вінницького державного аграрного ун-ту: Серія «Технічні науки». – Вінниця, 2009. – Вип. 2. – С.63–66. 4. *Серета Л.П.* Ресурсозберігаючий процес виготовлення силових гідроциліндрів сільськогосподарських машин / Л.П.Серета, Ю.Б.Паладійчук, Р.В.Будяк // Науково-технічний прогрес у розвитку машин і засобів механізації сільського господарства: Матер. наук.-техн. конф. – Вінниця: ВДАУ, 2009. – С.15–18. 5. *Мальнев В.И.* Исследование усилий, возникающих при алмазном шаржировании / В.И.Мальнев, В.В.Маковецкий // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 1. – С. 61–63. 6. *Верещака А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С.Верещака – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с. 7. *Посвятенко Е.К.* Технологічне забезпечення якості деталей машин при протягуванні / Е.К.Посвятенко, Ю.М.Іванов // Резание и инструмент в технологических системах. – 2003. – Вып.64. – С. 8–22. 8. А.С. 1466916 СССР, МКИ В24В 39/02//В21С 51//00. Динамометр для определения контактных давлений при деформирующем протягивании / Э.К.Посвятенко, О.А.Розенберг, А.Д.Крицкий, С.А.Родюков. – Оpubл. 23.03.89. – Бюл. № 11. 9. *Родюков С.А.* К вопросу о распределении нормальных давлений по длине контакта деформирующего элемента/ С.А.Родюков // Физические явления при резании и холодном пластическом деформировании металлов. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1988. – С. 143–150. 10. *Посвятенко Э.К.* Научное обоснование эффективности процесса деформирующе-режущего протягивания. Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля АН Украины, 1993. – 433 с. 11. *Посвятенко Едуард* Підвищення зносостійкості сталених різальних інструментів / Посвятенко Едуард, Посвятенко Наталя // Матеріали міжнародної конференції „Sakon’06”: Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojedznych. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2006. – С. 265–270.

Надійшла до редколегії 24.09.2010