

УДК 621.787

DOI: 10.30987/article\_5d2df088105a32.94525739

**С.К. Амбросимов**, д.т.н.

(ФГБОУ ВО Липецкий государственный технический университет,  
398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30)

E-mail: ambask@mail.ru

## **Комбинированное протягивание с опережающим деформированием и упругопластическим растяжением зоны резания**

*В статье представлены новые методы комбинированного протягивания. Изложена методика определения энергосиловых затрат при резании по механически упрочненному поверхностному слою для процесса деформирующе-режущего протягивания с наложением растягивающих напряжений на зону резания.*

**Ключевые слова:** деформирующе-режущее протягивание; силы резания.

**S.K. Ambrosimov**, Dr. Sc. Tech.

(FSBEI HE Lipetsk State Technical University, 30, Moskovskaya Str., Lipetsk, Russia, 398055)

## **Combined broaching with leading deformation and elastic-plastic cutting area stretching**

*In the paper there are presented new methods of combined broaching. A procedure for a power consumption definition at cutting a mechanically-strengthened surface layer for the process of deforming broaching with the application of stretching stresses on a cutting area is presented.*

**Keywords:** deforming and cutting broaching; cutting forces.

Метод деформирующе-режущего протягивания (ДРП), разработанный профессором Кузнецовым А.М. и его учениками, основан на комбинации двух способов воздействия на обрабатываемый материал, при котором перед каждым циклом резания металл подвергается механическому упрочнению с использованием деформирующих зубьев, установленных на теле протяжки перед режущими. Таким образом, каждый раз осуществляется опережающее пластическое деформирование (ОПД), что позволяет при срезании упрочненного слоя толщиной  $a_p$  от 0,025 до 0,06 мм снизить силы резания на 25...30 % [1], и повысить размерную стойкость режущих зубьев, а также повысить точность и качество поверхности протянутых отверстий.

Эффект снижения силы резания «нагарто-

ванной» пушечной стали впервые обнаружил Я.Г. Усачев. Им была предложена модель процесса резания механически упрочненных металлов, основанная на балансе работ пластической деформации. Однако экспериментальные исследования показали, что силы резания снижаются примерно в 1,5 раза, что составляет третью или четвертую часть от теоретически рассчитанных значений.

Объяснение причин снижения сил резания по механически упрочненному материалу с позиции теории дислокаций предложил профессор Кузнецов А.М. Однако предложенная им модель не позволяет количественно оценить силы резания.

Предложенная Усачевым Я.Г. модель баланса работ не учитывает историю и характер нагружения при комплексном воздействии на

обрабатываемый материал. Снижение сил резания при ОПД с позиции баланса работ достаточно хорошо объясняется накоплением поврежденности  $\omega$  [2] с учетом соответствия напряженного состояния предварительного деформирования напряженному состоянию последующего резания (рис. 1).

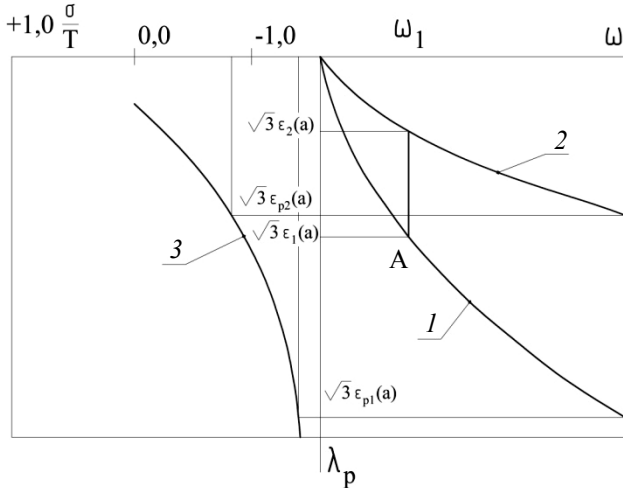


Рис. 1. Накопление поврежденности при резании с опережающим пластическим деформированием

При резании с ОПД необходимо учитывать не всю работу предварительного деформирования и соответствующую ей степень деформации сдвига  $\sqrt{3}\epsilon_1(a)$ , а лишь ту ее часть, которая соответствует накоплению поврежденности для напряженного состояния процесса резания, и соответствующей степени сдвиговой деформации  $\sqrt{3}\epsilon_2(a)$ . Таким образом, процесс накопления поврежденности при предварительном деформировании протекает медленнее по кривой 1 до некоторого значения  $\omega_1$  (точка А) с большими энергозатратами, чем при последующем резании. Затем накопление поврежденности протекает по кривой 2, соответствующей показателю напряженного состояния  $\sigma/T$  процесса резания, до окончательного разрушения, т.е. отделения стружки.

Недостатком ДРП с ОПД является то, что после выхода деформирующего зуба из отверстия происходит упругая разгрузка отверстия втулки, что ведет к падению обрабатываемой поверхности на режущую кромку зуба, расположенную следом за деформирующим. Из-за этого на поверхности появляется отпечаток зуба в виде ступеньки, величина которого составляет 0,02...0,03 мм. А из-за защемления силами трения опорного торца заготовки отверстие получает некоторую конусообразность, в результате чего зуб срезает неравномерный припуск по длине отверстия.

Устранить этот недостаток можно, обеспе-

чив одновременный выход деформирующих и режущих зубьев из отверстия, совместив зону резания и деформирования в плоскости перпендикулярной оси отверстия.

Использование комбинации резания и пластического деформирования в различных временных рамках воздействия на материал, сочетанием совершения этих процессов в различной последовательности, позволило создать новые методы, совмещающие во времени и пространстве деформацию и резание.

Совмещение этих процессов возможно двумя способами: размещением рабочих зон деформирующих зубьев перед режущими зубьями и в местах стружкоразделительных канавок, т.е. между режущими зубьями. Таким образом, разработан ряд протяжек с режущими кромками, расположенными в зоне заборного конуса, и цилиндрической ленточки деформирующих колец [3], т.е. в зонах с максимальным значением растягивающих упруго-пластических напряжений.

Деформирующие зубья 1 (рис. 2) в местах перехода заборного конуса в цилиндрическую ленточку 2, совмещены в поперечном сечении с главными режущими кромками зубьев 3 и образуют, таким образом, деформирующе-режущие (ДР) элементы. Такой элемент проходит через отверстие заготовки с натягом, деформирующие зубья 1 пластически деформируют слои металла и в зонах «К» (рис. 3) образуются канавки, но ввиду неразрывности деформации материала, между деформирующими зубьями в зонах «В» диаметр отверстия тоже увеличивается.

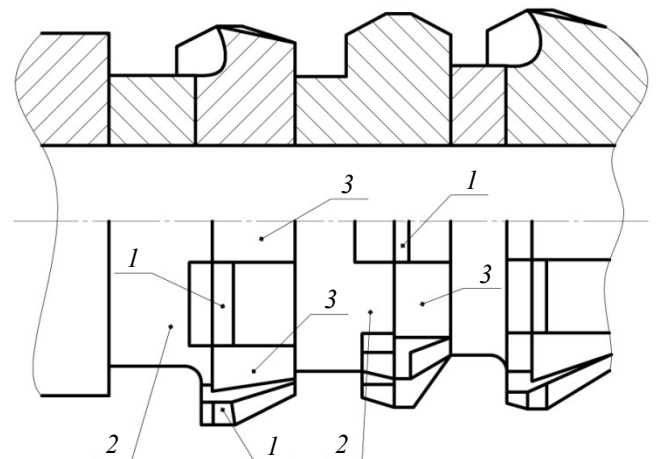


Рис. 2. Участок протяжки с ДР элементами

Слои металла между деформирующими зубьями растягиваются, и срезаются режущими зубьями по линии MN толщиной  $a_{p1}$ . Следующий за ним ДР элемент повернут на угол  $\psi$ , т.е. установлен таким образом, что за ре-

жущим зубом располагается деформирующий и наоборот. Деформирующие зубья этого элемента деформируют и пластически оттесняют металл в зоне резания предыдущего и следующего за ним элемента, и, кроме того, растягивают образованные между ними выступы с ранее упрочненным слоем металла, который вновь срезается по линии *MN* толщиной  $a_{p2}$ .

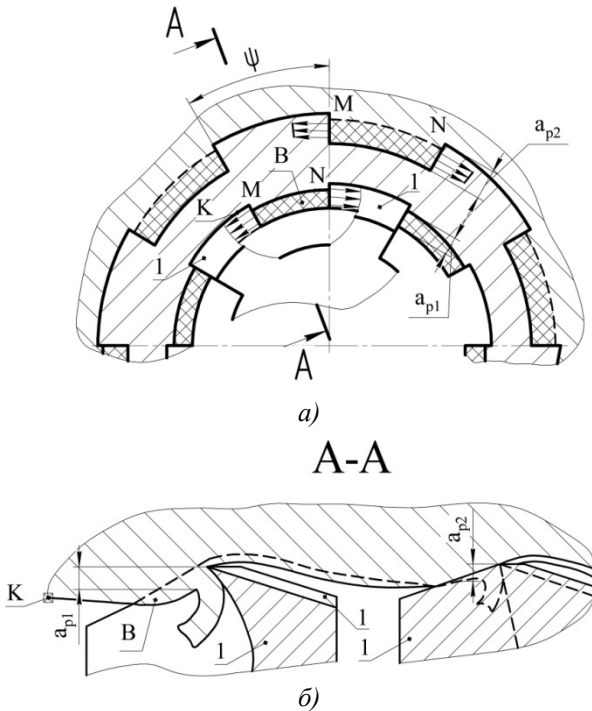


Рис. 3. Схема образования канавок и выступов, с последующим срезанием растянутых выступов

Стружкоделение для этой схемы протягивания, обеспечивается размещением деформирующих зубьев между режущими, что позволяет последним срезать выступ по линии *MN* в условиях свободного резания. В этом случае металл деформируется и срезается по всему периметру отверстия, что позволяет снизить длину протяжки и производительность протягивания.

За счет примыкания деформирующих зубьев к режущим, у последних отсутствуют вспомогательные режущие кромки, что увеличивает их стойкость у вершин зубьев. За счет выравнивания радиальных сил и (как следствие) натяга на деформирующие зубья по периметру и длине цилиндрического отверстия, происходит центрирование режущих зубьев, что снижает возможность перекосов протяжки и выравнивает толщину срезаемого слоя в поперечном и в продольном сечении отверстия.

Для ДРП с ОПД и упругопластическим растяжением (УПР) зоны резания, исчерпание запаса пластичности обрабатываемого материала и накопление поврежденности проис-

ходит интенсивнее [3], в три этапа (рис. 4), за счет изменения напряженного состояния в зоне резания путем ее растяжения и перед резанием за счет растяжения уже механически упрочненных слоев металла.

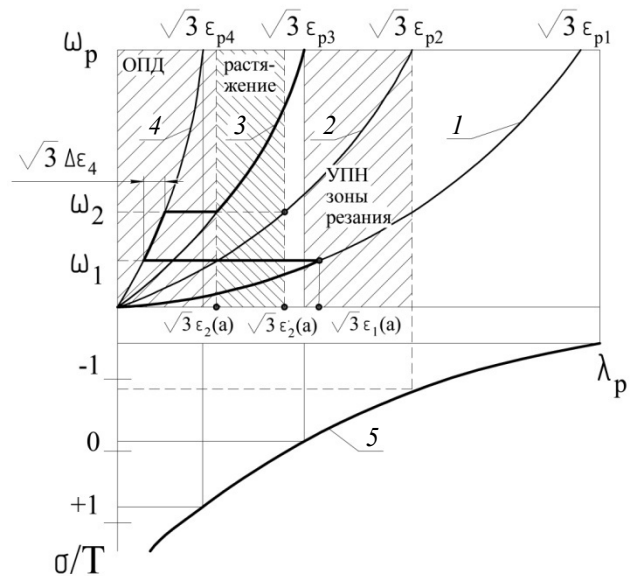


Рис. 4. Диаграмма процесса накопления поврежденности при ДРП с опережающим деформированием и растяжении слоев металла

Вначале накопление поврежденности проходит по кривой 1 от 0 при деформации сдвига  $\sqrt{3}\epsilon_1(a)$ , которая соответствует показателю напряженного состояния при процессе ОПД в зоне образующихся канавок «К» (см. рис. 2, а, б). Далее накопление поврежденности продолжается по ветви 4 от  $\omega_1$  до  $\omega_2$  (см. рис. 3), что соответствует показателю напряженного состояния дополнительного радиального растяжения втулки в зонах «В» между соседними деформирующими зубьями (см. рис. 2). Затем поврежденность продолжает накапливаться по кривой 3, когда металл с уже пониженным ресурсом пластичности за счет опережающего деформирования, и одновременно растянутый, подвергается резанию (см. рис. 3).

В этом случае резание осуществляется при увеличенном показателе напряженного состояния  $\sigma/T$ , за счет растяжения зоны резания. Без растягивающих напряжений в очаге процесса резания накопление поврежденности  $\omega_p$  до состояния разрушения проходило бы по ветви 2 (см. рис. 2). Работа резания с ОПД определяется по формуле

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 - \rho_5 - \rho_6 - \rho_7,$$

где  $\rho_1$  – удельная работа, затраченная на процесс деформации срезанного слоя металла;  $\rho_2$  – работа трения по передней и задней поверхности зуба;  $\rho_3$  и  $\rho_4$  – работа диспергирования и работа упругой деформации, соответственно, которыми можно пренебречь;

$\rho_5$  – величина, на которую снижается работа резания вследствие ее растяжения (за счет увеличения показателя  $\sigma/T$  в зоне обработки) (рис. 5);  $\rho_6$  – величина снижения работы резания за счет предварительного растяжения выступов «В» до их срезания;  $\rho_7$  – величина, на которую уменьшается удельная работа резания за счет накопления поврежденности при ОПД канавок «К»:

$$\rho_5 = \int_0^a \int_{\varepsilon_{p3}(a)}^{\varepsilon_{p2}(a)} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon da,$$

где  $\varepsilon_{p3}(a)$  – распределение деформации по толщине « $a$ » срезаемого слоя, при резании с наложением растягивающих напряжений (см. рис. 4);  $\varepsilon_{p2}(a)$  – зависимость степени деформации от толщины срезаемого слоя без растяжения зоны резания;

$$\rho_6 = \int_0^{a_1} \int_{\varepsilon_2(a)}^{\varepsilon_2'(a)} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon da,$$

где  $\varepsilon_2(a)$  – степень деформации при резании с предварительно накопленной поврежденностью  $\omega_1$ , без УПН, в зоне канавок «К» (см. рис. 3):

$$\varepsilon_2(a) = \varepsilon_{p2}(a) \left\{ \frac{\int_0^a \varepsilon_1(a) da}{\int_0^a \varepsilon_{p1}(a) da} \right\}^{K_1/K_2},$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств металла и показателя напряженного состояния  $\sigma/T$ , [2];  $\varepsilon_1(a)$  – степень деформации после опережающего деформирования;  $\varepsilon_{p1}(a)$  – степень деформации, соответствующая полному разрушению слоя металла при опережающем деформировании;  $\varepsilon_2'(a)$  – степень деформации, при резании без растяжения с накоплением поврежденности  $\omega_2$ , соответствующей показателю напряженного состояния резания с растяжением.

Расчеты, проведенные на основании экспериментов по установлению степени сдвиговой деформации в зоне «В» в зависимости от деформации (раздачи) отверстия от растягивающих напряжений и диаграммы пластичности, показали, что энергетические затраты  $\rho_6$  при вхождении деформирующих элементов с натягами  $i = 0,2 \dots 0,6$  мм в отверстие и растяжении выступов «В» до их срезания (см. рис. 2) составляют 2...3 % от всей работы резания. Экспериментально установлено, и подтверждено теоретико-экспериментальными исследованиями, что основное снижение силы резания происходит за счет ОПД ( $\rho_7$ ) и составляет от 20 до 30 %. Общая величина снижения удельной работы резания определяется по формуле

$$\Delta\rho = \rho_5 + \rho_7,$$

и составляет от 30 до 40% за счет предварительного истощения запаса пластичности и увеличения показателя напряженного состояния очага деформации в зоне резания.

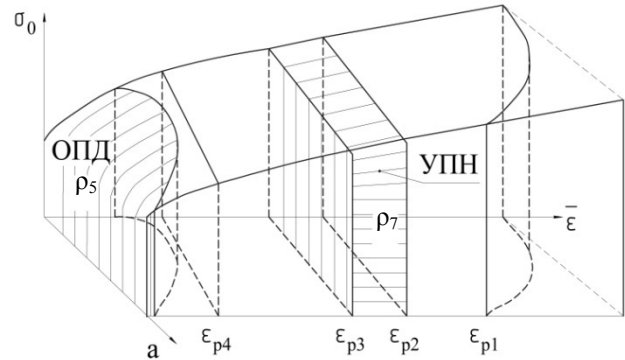


Рис. 5. Схема баланса работ пластической деформации при резании, опережающим деформированием и упругопластическом растяжении слоев металла с учетом накопления поврежденности

Задачей разработанной теоретико-экспериментальной модели является теоретический расчет величины снижения удельных энергосиловых затрат на резание  $\rho_5$  при наложении на зону резания растягивающих напряжений.

Усредненный показатель напряженного состояния при ОПД зоны резания определяется – по коэффициенту усадки стружки  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{k - \sin \gamma}{\cos \gamma} + \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \gamma}{k - \sin \gamma} \right) - \gamma \right], \text{ и (1)}$$

– по интенсивности напряжений:

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \text{ (2)}$$

полученной на основании измерения микротвердости срезанного слоя со стороны, прилегающей к поверхности зуба, а также по диаграмме пластичности [3], где  $\gamma$  – передний угол зуба протяжки;  $k$  – коэффициент усадки стружки;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения (рис. 6).

Показатель напряженного состояния  $\sigma/T$  определяется по формуле

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}}. \text{ (3)}$$

При решении задачи определения показателя напряженного состояния для резания с опережающим деформированием  $\sigma/T$  определяется по степени деформации сдвига  $\lambda_p$  соответствующей полному разрушению, т. е. при срезании слоя металла. При этом вводится допущение, что максимальное накопление поврежденности находится на прирезцовой поверхности стружки, там, где происходит ее отделение, т.е.  $\lambda_p$  определяется методом измерения микротвердости стружки в этой зоне и ее усадке. Главное напряжение  $\sigma_3$  лежит в ус-

ловной плоскости сдвига нормально к линии MN (см. рис. 6), а  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  расположены под углом  $45^\circ$  к направлению плоскости сдвига. Угол сдвига  $\beta$  определяется по известной формуле

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{k - \sin \gamma}.$$

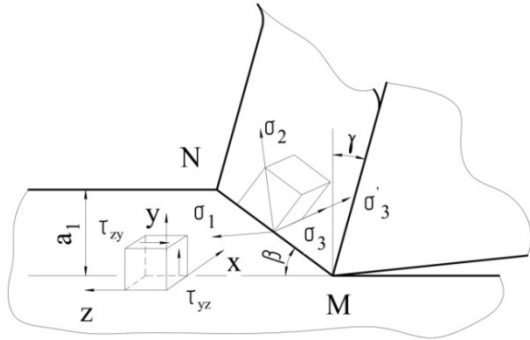


Рис. 6. Схема действия главных напряжений в зоне резания

При этом  $\sigma_3$  – наименьшее напряжение, т.к. деформация срезаемого слоя в направлении нормальном к направлению главного движения отсутствует. Условие для плоского деформированного состояния определяется по формуле

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (4)$$

Решая совместно выражения (2), (3), (4); получаем формулы для определения главных напряжений:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sigma}{T} - 1 \right) \sigma_0 \\ \sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sigma}{T} \right) \sigma_0 \\ \sigma_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sigma}{T} + 1 \right) \sigma_0 \end{cases}. \quad (5)$$

Увеличение показателя напряженного состояния при упругопластическом растяжении происходит за счет наложения дополнительного растягивающего напряжения  $\sigma'_3$  в зоне «В» (см. рис. 5, 6), которое определяется по кривой упрочнения в зависимости от интенсивности деформации. Интенсивность деформации определяется измерением диаметров отверстия в соответствующих зонах до и после прохождения деформирующего элемента по формуле

$$\varepsilon_{bc} = 2 \ln \frac{r_0}{r_0 - \delta_{bc}},$$

где  $r_0$  – радиус отверстия до прохождения деформирующего элемента;  $\delta_{bc}$  – радиальная пластическая деформация в зоне «В».

Слой металла, срезаемый зубом значитель-

но меньше периметра отверстия,  $\sigma'_3$  совпадает с направлением главного напряжения  $\sigma_3$ , действующего в зоне резания и равно  $\sigma_0$  (определяется экспериментально по кривой упрочнения, см. рис. 5).

Суммируя вектор напряжения  $\sigma_3$  и  $\sigma'_3$  и подставляя в формулу (3), получим формулу для расчета напряженного состояния при упругопластическом растяжении зоны резания:

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma'_3)}{\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3 - \sigma'_3)^2 + (\sigma_3 + \sigma'_3 - \sigma_1)^2]}}$$

### Выводы

Разработан и представлен новый высокоэффективный метод деформирующе-режущего протягивания с УПН зоны резания и инновационная конструкция деформирующе-режущей протяжки.

Представлена модель процесса комбинированного протягивания с опережающим механическим упрочнением поверхностного слоя и наложением на зону резания дополнительного упругопластического растяжения, основанная на изменении показателя напряженного состояния и накоплении поврежденности на каждой стадии процесса.

Разработана методика расчета удельной работы резания и показателя напряженного состояния в процессе резания с опережающим деформированием и последующим растяжением срезаемых слоев металла.

Для стали 45 теоретико-экспериментально рассчитано и подтверждено снижение удельных энергосиловых затрат при натягах от 0,2 до 0,6 мм в среднем на 30...40 %.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, А.М., Марин, А.З. Обработка комбинированным протягиванием круглых отверстий в деталях из вязких материалов // Автомобильная промышленность. – 1970. – №4. – С. 33 – 35.
2. Богатов, А.А., Мижирский, О.Н., Смирнов, С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Metallurgy, 1984. – 144 с.
3. Киричек, А.В., Амбросимов, С.К. Интенсификация процессов комбинированного протягивания круглых отверстий. – М.: Машиностроение-1, 2009. – 148 с.

### REFERENCES

1. Kuznetsov, A.M., Marin, A.Z. Round hole processing by broaching in parts made of ductile materials // *Automotive Industry*. – 1970. – No.4. – pp. 33-35.
2. Bogatov, A.A., Mizhiritsky, O.N., Smirnov, S.V. *Metal Ductility Life at Pressure Shaping*. – M.: Metallurgy, 1984. – pp. 144.
3. Kirichek, A.V., Ambrosimov, S.K. *Intensity of Round Hole Combined Broaching Processes*. – M.: Mechanical Engineering-1, 2009. – pp. 148.

Рецензент д.т.н. И.М. Володин