

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.787:621.91

В. Ю. Блюменштейн, К. П. Петренко

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММ НАГРУЖЕНИЯ НА СТАДИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В структуру типового технологического процесса упрочняющей механической обработки входят процесс резания и процесс поверхностного пластического деформирования (ППД). Эти процессы сопровождаются внедрением режущего или деформирующего инструмента в поверхностный слой, пластическим течением металла и возникновением очага деформации (ОД). Под влиянием режимов обработки в ОД вдоль линий тока происходит накопление деформации в условиях изменяющегося показателя напряженного состояния. Зависимость накопленной степени деформации сдвига Λ от показателя напряженного состояния Π представляет собой программу нагружения (ПН), под воздействием которой происходит накопление деформации, исчерпание запаса пластичности металла и возникает определенное состояние поверхностного слоя. Показатель напряженного состояния – это отношение среднего нормального напряжения σ к интенсивности кас-

тельных напряжений Т. ПН на стадиях механической обработки характеризуется наличием трех участков квазимонотонной деформации, в пределах которых показатель напряженного состояния изменяется монотонно. Точки смены знака деформации, а также точки «старта» и «финиша» ПН рассматриваются как ключевые.

Таким образом, ПН выступает в роли звена, связывающего режимы обработки с реальным физическим состоянием металла, и позволяет описывать накопление и трансформацию свойств поверхностного слоя. Данный подход дает возможность оценивать накопление и трансформацию свойств поверхностного слоя на всем протяжении обработки и эксплуатации изделия.

Для формирования оптимальных параметров качества и долговечности изделий необходимо получить аналитическое описание ПН.

Установлено, что ПН выражается через геометрические параметры ОД, которые, в свою оче-

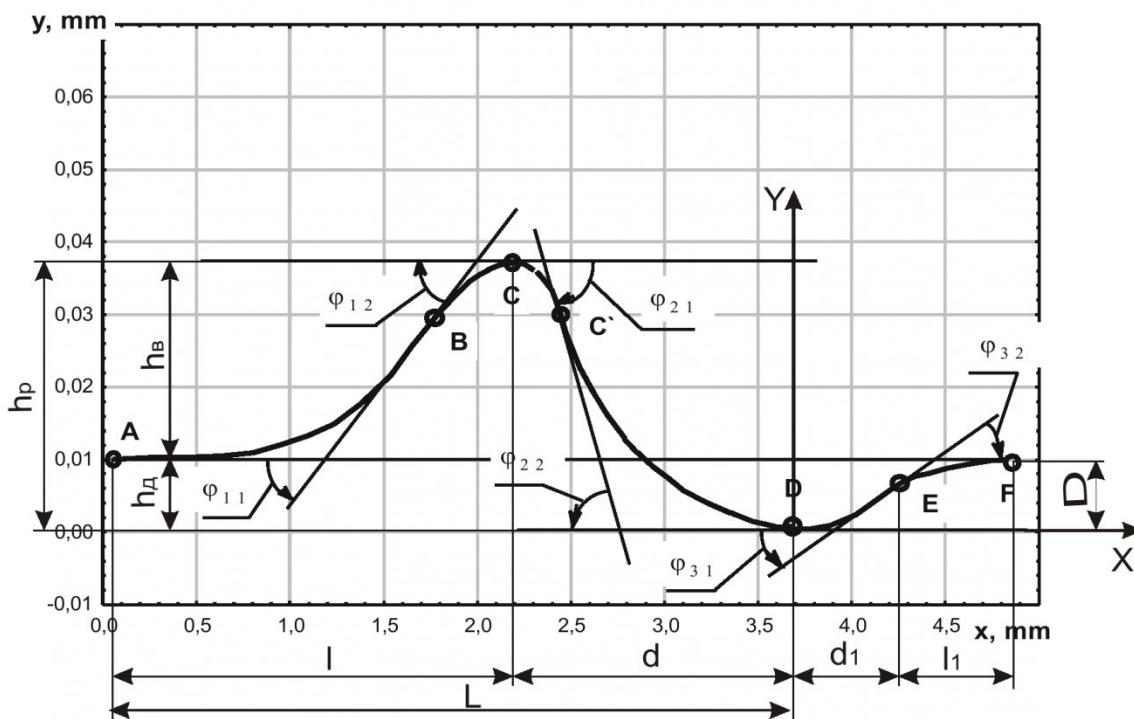


Рис.1. Схема к определению степени деформации сдвига по суммарному углу касательной к профилю очага деформации

редь, определяются режимами обработки [1]. Значение степени деформации сдвига Λ в ключевых точках ПН на стадии ППД может быть определено по суммарному углу касательной к профилю ОД на контактной и внеконтактной поверхностях (рис.1):

$$\Lambda_j = 2k \sum_{j=1}^{j=3} \arctg \left\{ \begin{aligned} & \left[-\frac{2(\pm(x_{|B,C,E})_j - c_j)}{g_j} \right] \times \\ & \times \left[b_j \exp \left(-\frac{(\pm(x_{|B,C,E})_j - c_j)^2}{g_j} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где j – номер участка квазимонотонной деформации; k – коэффициент кривизны профиля очага деформации и условий на контакте деформирующего инструмента с деталью; b_j , c_j и g_j – коэффициенты на соответствующем участке квазимонотонной деформации; x_B , x_C и x_E – абсциссы точек перегиба соответствующего участка профиля очага деформации.

В случае если начало системы координат совпадает с точкой D , коэффициенты c_j могут быть определены как:

$$c_1 = c_2 = x_C = -d, \quad c_3 = x_F = d_1 \quad (2)$$

Коэффициенты b_j и g_j определяются по формулам:

$$\begin{aligned} b_1 &= h_e; \quad b_2 = h_p = h_d + h_b; \quad b_3 = \Delta; \\ g_1 &= 0,9 + \frac{0,1}{\sqrt{h_e^2 + l^2}}; \quad g_2 = \frac{d}{5}; \quad g_3 = \frac{d_1}{20} \end{aligned} \quad (3)$$

Оценка показателя напряженного состояния может быть проведена с помощью общего описания вида [4]:

$$\Pi = \Pi(h_i, d_i, l_i, \dots), \quad (4)$$

Для определения вида моделей (4) были проведены экспериментальные исследования формирования механического состояния поверхностного слоя на стадии ППД. Материал образцов – сталь 45 (ГОСТ 1050-88) в состоянии поставки (HV 160-180). Обкатывание проводилось с использованием однороликовой установки, диаметр ролика $D_p = 95$ мм, подача $S = 0,07$ мм/об, частота $n = 630$ об/мин. Остальные режимы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы обкатывания экспериментальных образцов

Образец	P , Н	R_{np} , мм
901	2500	2,5
902	2500	5
804	2000	8,5
806	1500	5
807	1000	13,5

После обкатывания производилось профило-

графирование полученных ОД, которые наряду со свойствами материала использовались в качестве граничных условий для расчета параметров механического состояния поверхностного слоя методом конечных элементов [2]. Накопленные значения степени деформации сдвига измерялись методом акустической структурометрии [3].

Результаты показывают, что ПН для всех образцов стартует со значения $\Pi_0 \approx -0,577$, а финиширует при $\Pi_0 \approx +0,577$. Для полного описания ПН необходимо получить зависимость значения показателя схемы напряженного состояния от параметров ОД в конце первого (начале второго) этапа Π_1 и в конце второго (начале третьего) этапа Π_2 .

Рассмотрим, как изменяется показатель напряженного состояния при различных режимах обработки и геометрических размерах ОД. Введем понятие показателя мощности ОД, характеризующее интенсивность пластического течения:

$$w = d \cdot h_e \quad (5)$$

где d – горизонтальная проекция передней дуги контакта; h_e – высота волны.

Показатель мощности w учитывает как горизонтальные, так и вертикальные размеры ОД.

Расчетные значения показателя в конце первого Π_1 и второго участка Π_2 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Показатель напряженного состояния в зависимости от геометрических параметров очага деформации

Образец	w	Π_1	Π_2
901	0,0914	-3,71	0,60
902	0,0646	-3,51	0,62
804	0,0386	-3,29	0,59
806	0,0364	-3,14	0,60
807	0,0140	-2,85	0,63

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показывает, что с увеличением мощности (с увеличением интенсивности пластического течения в ОД) показатель напряженного состояния смещается в отрицательную область и увеличивается по абсолютному значению. Влияние режимов обработки и геометрии ОД на показатель напряженного состояния в конце второго этапа в рассматриваемых очагах не выражено.

Обработка экспериментальных данных позволила получить выражение:

$$\Pi_1 = -5,336(w)^{0,152} \quad (6)$$

Экспериментальные и расчетные значения Π_1 показаны на рис. 2.

Рассмотрим закономерности изменения величин, определяющих значение Π . На рис. 3-5 показано изменение соответственно среднего нормального напряжения, интенсивности касательных напряжений и показателя напряженного состояния на первом этапе квазимонотонной деформации для очагов № 901, 902 и 806. Для облегче-

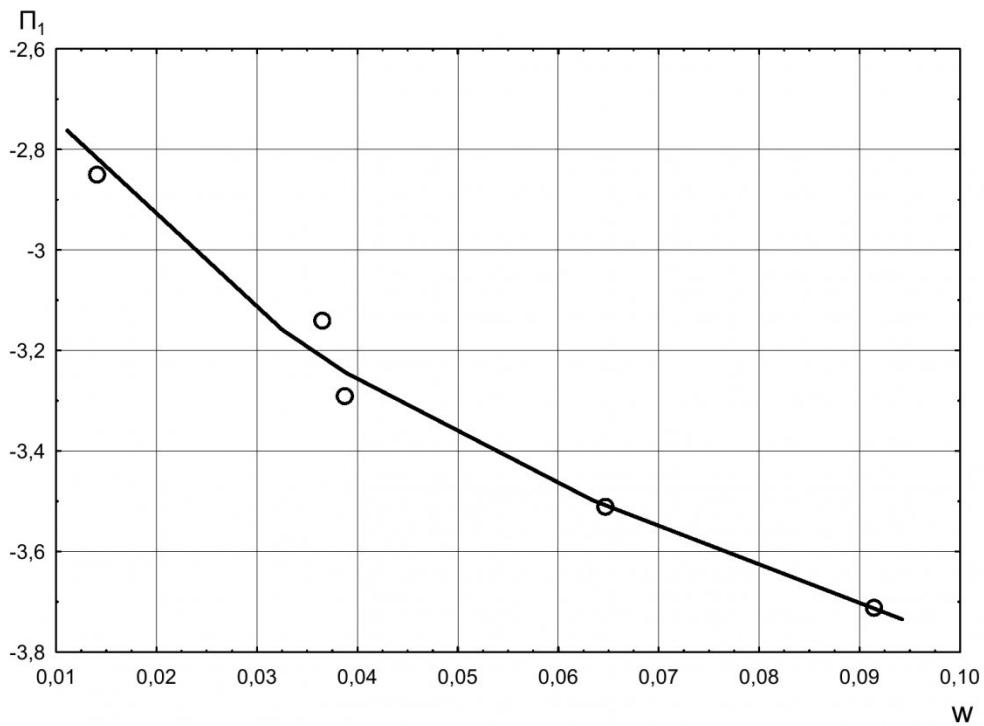


Рис.2. Расчетные и экспериментальные значения показателя напряженного состояния в конце первого участка квазимонотонной деформации в зависимости от мощности ОД

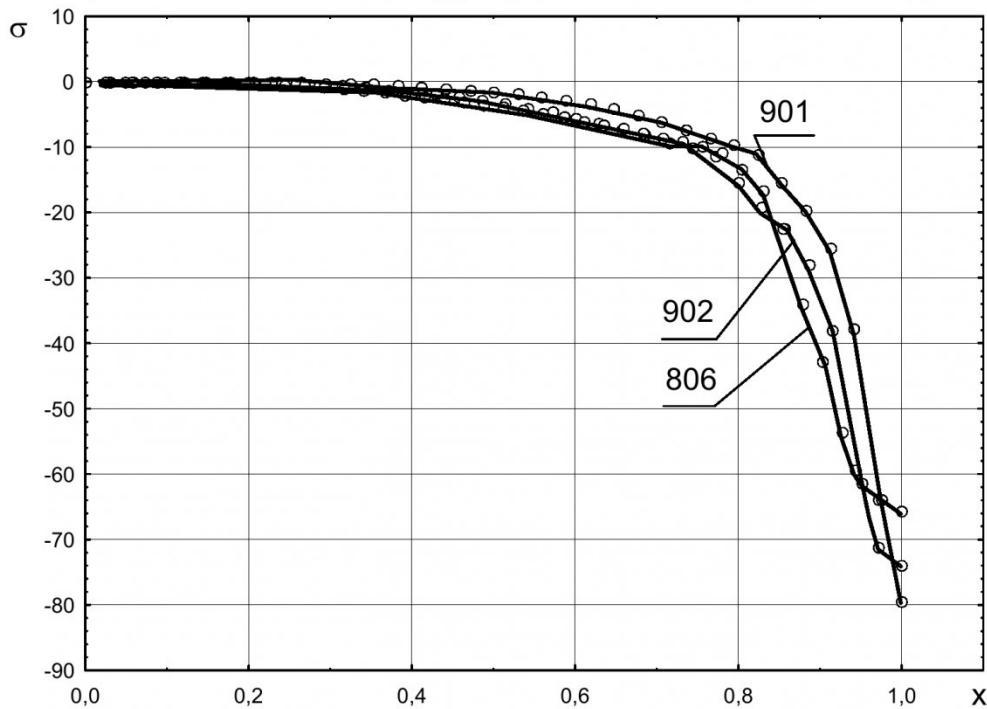


Рис.3. Изменение среднего нормального напряжения вдоль первой линии тока на первом этапе квазимонотонной деформации (размерность по оси ординат – кгс/мм²)

ния сопоставления результатов на всех рисунках по оси абсцисс отложена относительная координата X ; при этом за единицу принимается длина линии тока на данном участке квазимонотонной деформации.

Анализ результатов показывает, что изменение среднего нормального напряжения и интен-

сивности касательных напряжений для всех очагов имеет схожий характер. В образце №901, полученным при обработке с минимальным радиусом закругления и максимальным усилием обкатывания за счет малых линейных размеров ОД в сочетании со значительным пластическим течением наблюдается наибольший градиент изменения

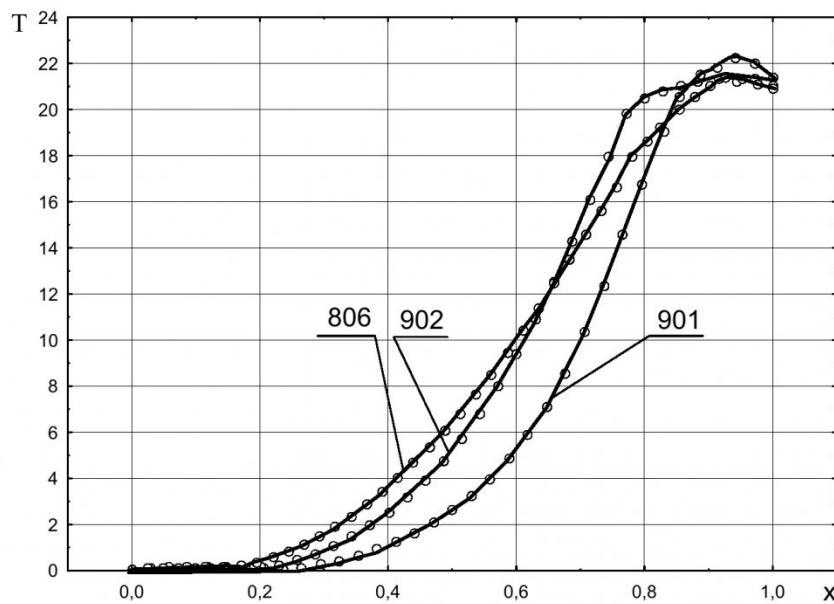


Рис.4. Изменение интенсивности касательных напряжений вдоль первой линии тока на первом этапе квазимонотонной деформации (размерность по оси ординат – $\text{кгс}/\text{мм}^2$)

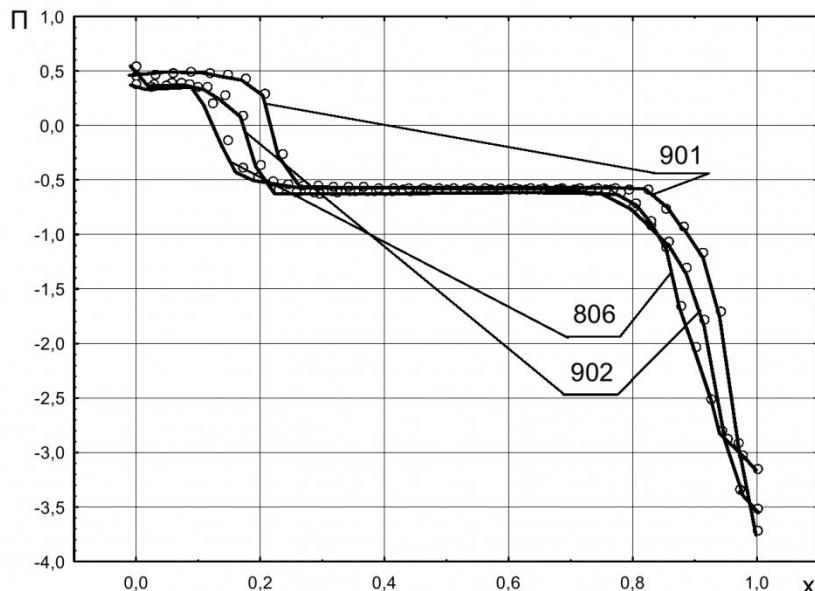


Рис.5. Изменение показателя напряженного состояния вдоль первой линии тока на первом этапе квазимонотонной деформации (размерность по оси ординат – $\text{кгс}/\text{мм}^2$)

σ и T .

Важной особенностью формирования показателя напряженного состояния является совпадение окончания первого участка квазимонотонной деформации с минимальным значением среднего нормального напряжения. При этом максимальное значение интенсивности касательных напряжений оказывается уже пройденным, и в момент смены знака деформации значения T становятся близкими для всех очагов деформации.

Таким образом, основным фактором, определяющим отмеченную выше закономерность увеличения показателя напряженного состояния при увеличении мощности очага, является увеличение среднего нормального напряжения в данной точ-

ке.

В конце второго (начале третьего) этапа разница между σ и T для различных очагов сопоставима, в силу чего значения отношений этих величин оказываются близкими.

Процессы резания и ППД имеют подобие в формировании механического состояния поверхностного слоя [1]. В связи с этим для определения степени деформации сдвига в ключевых точках программы нагружения на стадии резания также используется выражение (1) с учетом особенностей формирования механического состояния на стадии резания:

- отсутствие свободной поверхности ОД; в этом качестве рассматривается линия разделения

потоков металла в стружку и под инструмент;

- влияние гидростатического давления стружки на накопление деформации в ОД;
- малые размеры ОД.

Тогда для определения степени деформации сдвига на стадии резания можно записать:

$$\Lambda_j = 2k \sum_{j=1}^{j=3} k_j^{\Lambda_{\text{рез}}} \arctg \left\{ \begin{aligned} & \left[-\frac{2(\pm(x_{|B,C,E})_j - c_j)}{g_j} \right] \times \\ & \times \left[b_j \exp \left(-\frac{(\pm(x_{|B,C,E})_j - c_j)^2}{g_j} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $k_j^{\Lambda_{\text{рез}}}$ – функция подобия накопления деформации для резания на данном участке квазимонотонной деформации, в качестве аргументов функции используются геометрические параметры ОД.

По аналогии со значениями накопленной степени деформации сдвига предлагается определять значение показателя схемы напряженного состояния в конце первого (начале второго) этапа на стадии резания как:

$$\Pi_1 = k_{\text{рез}}^{\Pi} a_{\Pi} (w)^{b_{\Pi}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{рез}}^{\Pi}$ – некоторая функция подобия показателя напряженного состояния, a_{Π} и b_{Π} – коэффициенты зависимости показателя напряженного состояния от мощности очага деформации.

Для определения вида функций подобия были проведены экспериментальные исследования формирования программ нагружения на стадии свободного ортогонального резания с использованием метода визиопластичности. Плоские экспериментальные образцы из стали 45 в состоянии

поставки (HV 160-180) полировались, на поверхность наносилась делительная сетка с шагом 30 мкм. Образцы устанавливались в специальном приспособлении на горизонтально-фрезерном станке, течение металла в направлении, перпендикулярном плоскости подачи, ограничивалось закаленным стеклом. На консоль станка устанавливался резец с требуемой геометрией режущей пластины. В процессе резания производилась скоростная видеосъемка и последующая оцифровка картины течения металла в ОД, по которой методом делительных сеток определялись параметры напряженно-деформированного состояния. Также расчет показателей механического состояния производился с использованием метода конечных элементов.

Режимы резания: радиус округления режущей кромки $\rho = 0,15$ мм; передний угол $\gamma = 35^\circ$; задний угол $\alpha = 10^\circ$, остальные режимы приведены в табл. 3.

Полученные значения степени деформации сдвига и показателя напряженного состояния в ключевых точках ПН, рассчитанные методом делительных сеток, указаны в табл. 4.

Полученные результаты показывают особенности формирования ПН на стадии резания, вызванные пластическим течением металла в ОД.

Так, ПН стартует с положительных значений Π_0 , при этом увеличение глубины срезаемого слоя приводит к увеличению начального значения показателя напряженного состояния. Эта особенность ПН связана с формированием зоны растягивающих напряжений в области между критической линией тока и линией сдвига при резании.

При режимах резания, характеризующихся малой интенсивностью пластического течения (образец №14), значение показателя напряженного

Таблица 3. Режимы резания в экспериментальных исследованиях формирования ПН на стадии резания

Номер образца	Глубина срезаемого слоя a , мм	Скорость резания V , м/мин
12	0,36	0,07
13	0,36	0,05
14	0,3	0,025
15	0,36	0,0335
16	0,36	0,1

Таблица 4. Значения степени деформации сдвига и показателя напряженного состояния в ключевых точках ПН на стадии резания

Образец	12	13	14	15	16
Λ_0	0	0	0	0	0
Π_0	+0,880	+0,774	+0,512	+0,690	+0,958
Λ_1	0,0234	0,0171	0,0035	0,0102	0,0327
Π_1	-0,147	-0,105	+0,062	-0,037	-0,220
Λ_2	0,0315	0,0222	0,0050	0,0132	0,0444
Π_2	+0,865	+0,837	+0,787	+0,818	+0,876
Λ_3	0,0327	0,0230	0,0051	0,0135	0,0462
Π_3	+0,577	+0,577	+0,577	+0,577	+0,577

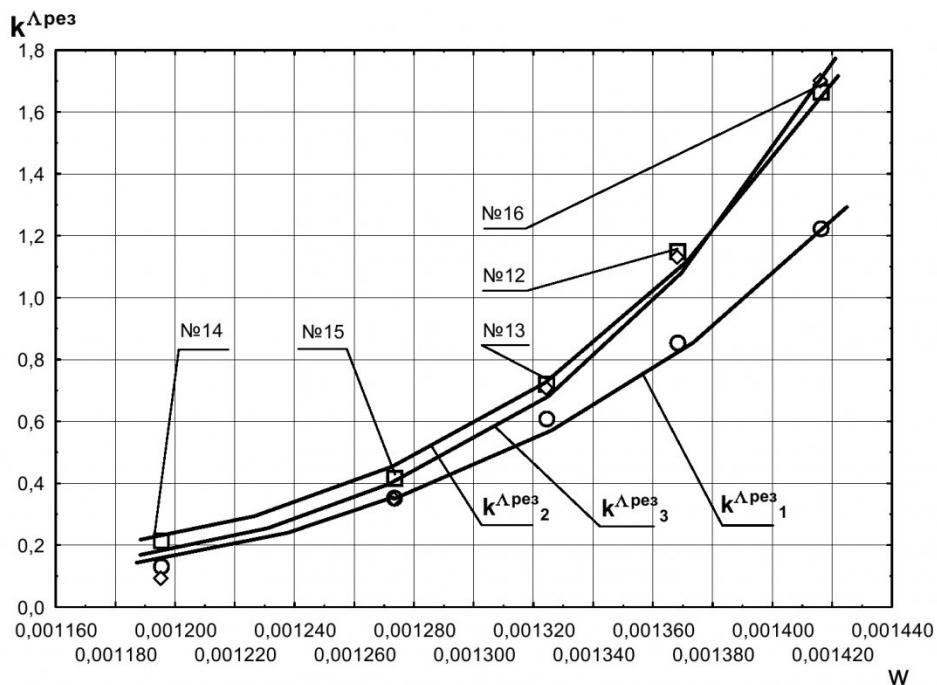


Рис.6. Зависимость функции подобия для накопленной степени деформации сдвига от мощности ОД при резании

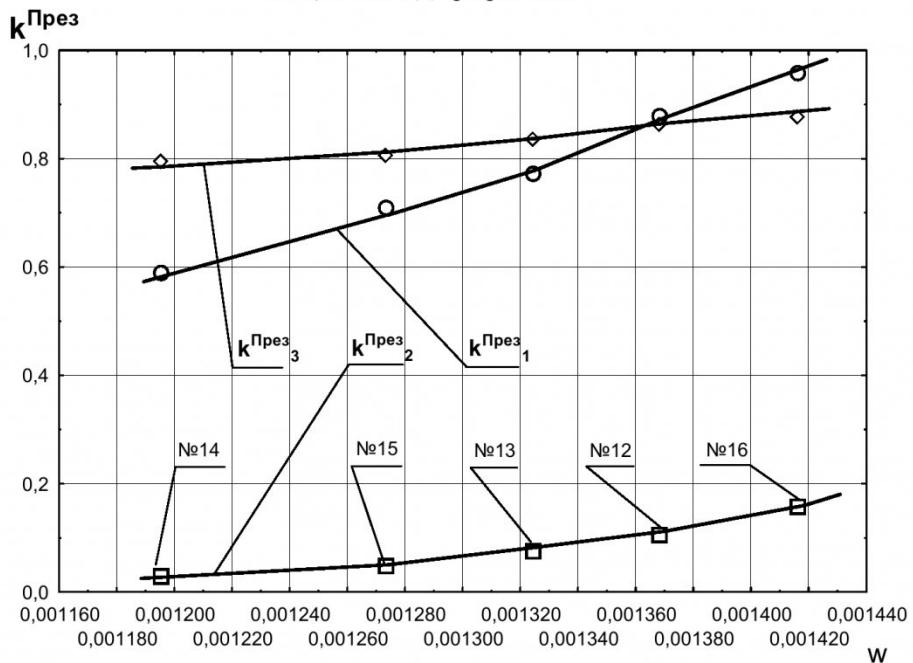


Рис.7. Зависимость функции подобия для показателя напряженного состояния от мощности ОД при резании

состояния в конце первого участка квазимонотонной деформации не переходит в отрицательную область.

Обращает также на себя внимание относительно большее значение накопленной степени деформации сдвига на втором этапе квазимонотонной деформации.

Вид и коэффициенты моделей функций подобия $k_j^{\Delta \text{рез}}$ и $k_j^{\Pi \text{рез}}$ определялись следующим образом.

По геометрическим параметрам ОД при резании рассчитывались параметры, применяющиеся для описания очагов деформации при ППД – d и h_b . Эти параметры полностью определяются радиусом скругления режущей пластины и углом вдавливания. Угол вдавливания при резании является постоянной величиной и составляет 40° [1]. В связи с этим для оценки интенсивности пластического течения металла при резании с различной глубиной срезаемого слоя и постоянным радиусом скругления требуется использование еще одного

параметра. В качестве этого параметра выбрана горизонтальная проекция участка критической линии тока от начала очага деформации до точки разделения потоков металла – I. Для стадии резания показатель, характеризующий мощность очага деформации, принимает вид:

$$w = \frac{d}{l} h_e \quad (9)$$

Далее рассчитывались значения степени деформации сдвига по выражению (1) – $\Lambda^{(1)}$, определялось значение функций подобия для данного образца:

$$k_j^{\Lambda_{\text{рез}}} = \frac{\Lambda_j^{\text{рез}}}{\Lambda_j^{(1)}}, \quad (10)$$

где $\Lambda_j^{\text{рез}}$ – значение степени деформации сдвига на j -ом этапе квазимонотонной деформации стадии резания (табл. 4).

Полученные значения функций подобия $k_j^{\Lambda_{\text{рез}}}$ в зависимости от мощности очага деформации показаны на рис. 6. Аналитически эти зависимости могут быть описаны в виде:

$$k_1^{\Lambda_{\text{рез}}} = 0,689e^{-5} \exp(8551,74w), \quad (11)$$

$$k_2^{\Lambda_{\text{рез}}} = 0,389e^{-5} \exp(9168,61w), \quad (12)$$

$$k_3^{\Lambda_{\text{рез}}} = 0,704e^{-6} \exp(10397w). \quad (13)$$

Аналогичным образом были определены значения функций подобия и для показателя напряженного состояния (рис. 7):

$$k_1^{\Pi_{\text{рез}}} = 0,039 \exp(2268,49w), \quad (14)$$

$$k_2^{\Pi_{\text{рез}}} = 0,206e^{-5} \exp(7944,65w), \quad (15)$$

$$k_3^{\Pi_{\text{рез}}} = 0,437 \exp(493,75w). \quad (16)$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением мощности ОД при резании значения функций подобия возрастают. При этом для степени деформации сдвига значения $k_j^{\Lambda_{\text{рез}}}$ могут быть менее, и более единицы, что характе-

ризует сложный характер формирования ПН на стадии резания.

Значения функций подобия для степени деформации сдвига для первого квазимонотонного участка меньше, чем для второго и третьего участков, что обусловлено относительно большим накоплением деформаций на втором и третьем участке по сравнению со стадией ППД.

Влияние мощности ОД на значения функций подобия для показателя напряженного состояния различно для разных участков ПН. Так, при сопоставимом изменении мощности очага деформации, $k_1^{\Pi_{\text{рез}}}$ изменяется сильнее, чем $k_2^{\Pi_{\text{рез}}}$ и $k_3^{\Pi_{\text{рез}}}$. Значение $k_2^{\Pi_{\text{рез}}}$ существенно меньше, чем значения других функций подобия для показателя напряженного состояния. Это обусловлено сдвигом показателя напряженного состояния в положительную область, что объясняется более "жесткими" условиями пластического течения при резании.

Выводы

1. Получено аналитическое описание программ в категориях ключевых точек для стадий резания и ППД в зависимости от геометрических параметров очагов деформации.

2. Для комплексной оценки интенсивности пластической деформации в ОД предложено использовать произведение характерных горизонтальных и вертикальных размеров ОД, характеризующее мощность ОД.

3. Процессы резания и ППД являются подобными с точки зрения формирования механического состояния поверхностного слоя, поэтому значения степени деформации сдвига и показателя напряженного состояния для стадии резания могут быть определены по зависимостям для ППД с учетом функций подобия.

4. Получены аналитические выражения для определения значений функций подобия по геометрическим параметрам ОД при резании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.
2. Кречетов А. А. Методика расчета параметров механического состояния поверхностного слоя деталей машин // Вестн. Кузбасского гос. техн. унив., 2001. №5. – С. 27-31.
3. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А.А. Исследование накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности при ППД с использованием ультразвукового контроля // Упрочняющие технологии и покрытия. – №10. – М.: Машиностроение, 2007. – С. 40-43.
4. Блюменштейн В. Ю. Описание программы нагружения очага деформации на стадии поверхностного пластического деформирования (ППД) // Инструмент Сибири. – 2001. – №1. – С. 18-23.

□ Авторы статьи:

Блюменштейн
Валерий Юрьевич
- докт. техн. наук, проф., проректор
КузГТУ по научной работе. E-mail:

Петренко
Константин Петрович
- ст. преп. каф. технологии металлов
КузГТУ, тел. 3842-39-63-86