

Анализ полученных результатов показывает, что максимальную твердость литые стали с разным содержанием углерода приобретают после закалки в интервале температур 940-960°C. Дальнейшее повышение температуры закалки приводит к снижению твердости, что, по-видимому, связано с увеличением количества аустенита остаточного. Следует также отметить, что наиболее низкую твердость после закалки имеет сталь 2X3, т.к. она содержит наименьшее количество углерода, а следовательно карбидов.

Образцы литой стали, закаленные с температур 940-960°C подвергнуты отпуску с различной температурой и временем выдержки.

Полученные данные приведены на рис. 2.

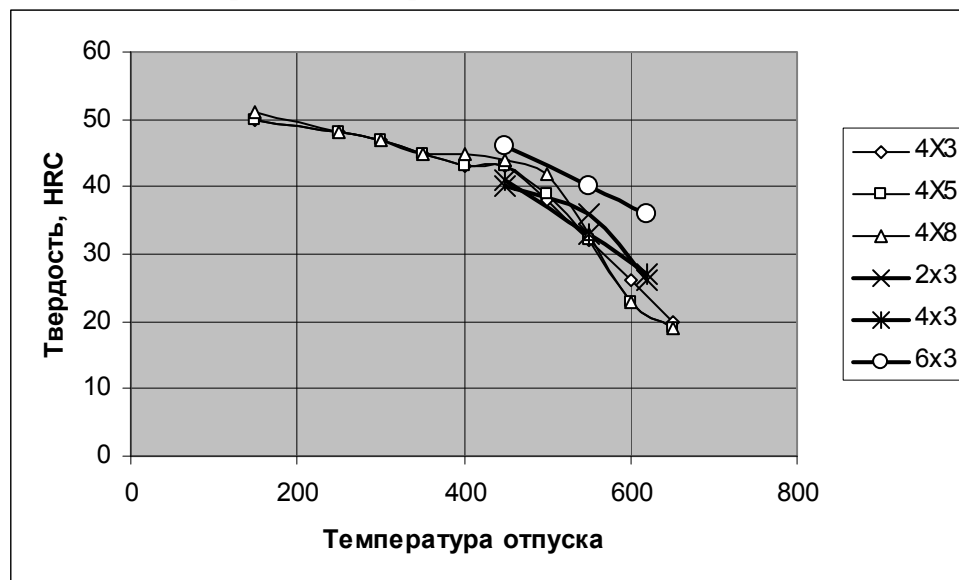


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на твердость стали.

В процессе отпуска литых сталей с 3% хрома, но с разным содержанием углерода твердость монотонно снижается по мере повышения температуры отпуска. Наиболее сильно твердость падает у стали 6X3, однако её значения все же выше, чем у сталей 2X3 и 4X3. После отпуска 620°C твердость стали 6X3 составляет 37 HRC, а у сталей 2X3 и 4X3 – 25 и 27 HRC соответственно.

Литература

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали, М. «Металлургия», 1975.
2. Тылкин М.А., Васильев Д.И., Рогалев А.М., Шкатов А.П., Бельский Е.И. Штампы для горячего деформирования металлов, М., «Высшая школа», 1977.
3. Гудремон Э.И. «Металловедение и термическая обработка металлов» № 6, 1982.
4. Гуляев А.П., Инструментальные стали, справочник, 1975.

К анализу механики процесса резания упрочняемого материала. Стружкообразование.

д.т.н., проф. Оленин Л.Д.
МГТУ «МАМИ»

В практике проектирования процессов резания, как правило, используются эмпирические зависимости, полученные на основе планирования факторного эксперимента. Эта методика достаточно универсальна, однако существенное увеличение числа изучаемых факторов сопряжено с лавинообразным увеличением количества независимых опытов, притом что математический аппарат не позволяет описать взаимосвязь всех факторов. В этой связи разработка аналитических методов расчета параметров процесса резания остается актуальной задачей.

В 1870 г. И.А. Тиме предложил схему процесса резания с так называемой "плоскостью скола"[1]. По существу это прообраз схемы резания с единой плоскостью сдвига, которая считается излишне элементарной и неадекватной, из-за того, во-первых, что не позволяет

оценить скорость деформации, во-вторых, она не отражает того обстоятельства, что пластическое деформирование стружки продолжается и после пересечения плоскости сдвига, о чем якобы свидетельствует так называемая «текстура».

Фактически сдвиг происходит не в гипотетической плоскости, а в некотором физическом слое, но именно этим слоем и ограничивается очаг деформации в зоне стружкообразования. Высота его, как известно [2], составляет от 0.2 до 0.5 толщины срезаемого слоя, а итоговая деформация равна относительному сдвигу.

Рассматривая слой сдвига в качестве границы, на которой тангенциальные составляющие скорости терпят разрыв, а нормальная скорость сохраняет свое значение, в работе [3] выполнен анализ механики стружкообразования в случае резания инструментом без наклона главной режущей кромки. Анализ выполнен энергетическим методом с использованием экстремальных положений теории течения. В частности, реализуемая скорость схода стружки и угол сдвига определены из условия минимума мощности, подводимой через переднюю поверхность, где трение подчиняется закону Кулона. На основании оценки скорости деформации сделан вывод, что условия деформирования при стружкообразовании соответствуют полной холодной деформации.

В настоящей работе процесс резания рассматривается как совокупность двух непрерывно протекающих актов: стружкообразования и пластического деформирования приповерхностного слоя. При этом деформируемый материал как механическая система обладает не одной, а несколькими степенями свободы. Проявляется это в том, что скорость схода стружки или, как принято говорить, ее «усадку» невозможно однозначно спрогнозировать исходя только из кинематических параметров процесса резания. Кроме того, реализуемая на практике толщина срезаемого слоя, как правило, меньше глубины проникновения режущего клина в тело заготовки; часть слоя подминается скругленной кромкой инструмента и подвергается пластическому деформированию.

Анализ выполнен энергетическим методом на основе теории пластического течения при допущении, что обрабатываемый (деформируемый) материал является изотропным, жесткопластичным, подверженным деформационному упрочнению, что соответствует условиям полной холодной деформации. Кривая упрочнения аппроксимирована линейной функцией вида

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot (1 + B \cdot \bar{\epsilon}) \quad (1)$$

где: σ_0 и σ_s - истинные пределы текучести исходного и деформированного металла;

B – параметр, характеризующий упрочнение;

$\bar{\epsilon}$ - итоговая деформация.

Принято также, что контактное трение не достигает предельной величины и пропорционально нормальному давлению, то есть:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (2)$$

где: τ - контактное трение, μ - коэффициент трения; σ_n - нормальное давление.

Используется разрывное поле скоростей, при конструировании которого плоскость сдвига в зоне стружкообразования рассматривается как первое приближение поверхности, на которой нормальная скорость сохраняет свое значение, а касательные составляющие терпят разрыв. Вместе с тем, при оценке скорости деформации принято во внимание, что сдвиг осуществляется не в теоретической плоскости, а в некотором физическом слое конечной толщины, равном, как известно [2].

$$H = (0,2 \dots 0,5) \cdot a \quad (3)$$

Считается, что подводимая извне мощность расходуется на пластическую деформацию сдвига при стружкообразовании, вязкое разрушение, связанное с образованием новых поверхностей, преодоление сил контактного трения на передней и задней поверхностях инструмента и на пластическую деформацию приповерхностного слоя.

Схема процесса и план скоростей в зоне стружкообразования и в зоне упрочнения приповерхностного слоя приведены на рис. 1.

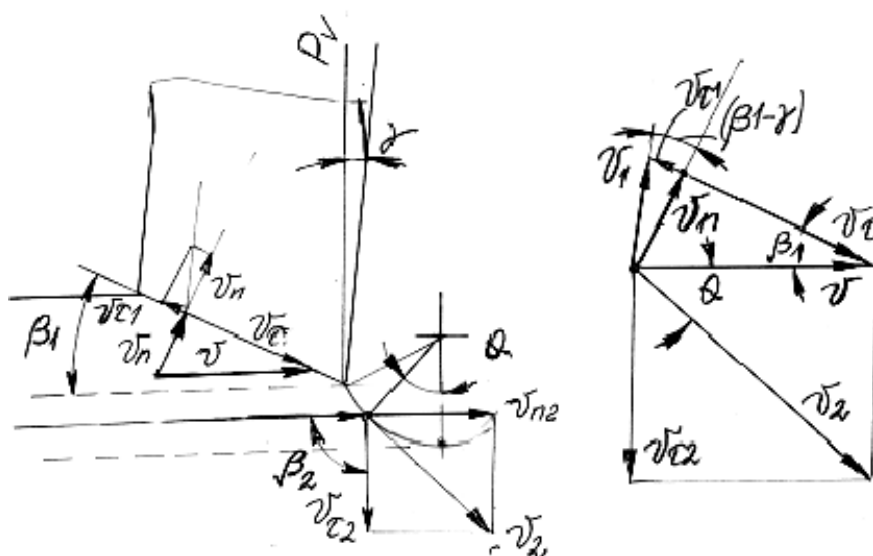


Рис. 1. Схема процесса резания скругленным пуансоном и поле скоростей, обще для зон стружкообразования и пластического деформирования поверхностного слоя.

С точки зрения механики сплошной среды плоскость сдвига является границей разрыва скоростей, где по определению тангенциальные составляющие скорости терпят разрыв, а нормальная скорость сохраняет свое значение

В соответствие с принятой схемой построен единый план скоростей (см. рис. 1 б) и определены компоненты скоростей для зоны стружкообразования (зона 1)

$$v_n = v \sin \beta_1; \quad (4)$$

$$v_\tau = v_n \operatorname{ctg} \beta_1; \quad (5)$$

$$v_1 = v \cdot \zeta \quad (6)$$

$$v_{\tau 1} = v_n \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma) \quad (7)$$

$$\zeta_1 = \frac{v_1}{v} = \frac{\sin \beta_1}{\cos(\beta_1 - \gamma)} \quad (8)$$

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{\zeta \cos \gamma}{1 - \zeta \sin \gamma} \quad (9)$$

Здесь обозначено: v - скорость резания; v_n - нормальная скорость на границе разрыва скоростей; v_1 - скорость схода стружки; v_τ - тангенциальная составляющая скорости (заготовки) перед границей разрыва скоростей; $v_{\tau 1}$ - тангенциальная составляющая скорости (стружки) за границей разрыва скоростей; ζ_1 - скорость схода стружки в безразмерном виде (в долях от скорости резания).

В соответствии с теорией пластического течения в общем случае интенсивность скорости деформации равна:

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_x)^2 + \frac{3}{2}(\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2)}, \quad (10)$$

где: $\dot{\epsilon}_x$, $\dot{\epsilon}_y$, $\dot{\epsilon}_z$ - линейные, а $\dot{\gamma}_{xy}$, $\dot{\gamma}_{zx}$, $\dot{\gamma}_{zy}$ - угловые (сдвиговые) компоненты скорости деформации.

Считается, что при стружкообразовании имеет место так называемая «плоская» деформация сдвига, когда три осевые и две сдвиговые компоненты скорости деформации равны

нулю. Вообще говоря, это не совсем так: в общем случае, когда угол наклона режущей кромки не равен нулю, деформация не является плоской, и компоненты скорости деформации равны:

$$\dot{\varepsilon}_x = \dot{\varepsilon}_y = \dot{\varepsilon}_z = \dot{\gamma}_{xy} = 0, \quad (11)$$

$$\dot{\gamma}_{zx} = \frac{\lambda}{\Delta\tau_1}, \quad (12)$$

$$\dot{\gamma}_{zy} = \frac{\bar{\gamma}_{zy}}{\Delta\tau_1}. \quad (13)$$

Здесь $\bar{\gamma}_{zy}$ - компонента итоговой деформации сдвига; $\Delta\tau_1$ - время, за которое отделяемая от заготовки частица материала пересекает физический слой сдвига, который по существу является очагом деформации в зоне стружкообразования.

Подставляя значения компонентов скорости деформации в уравнение (10), получаем величину интенсивности скорости деформации при стружкообразовании.

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{1}{\sqrt{3}\Delta\tau_1}. \quad (14)$$

По определению скорость деформации равна:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\Delta\varepsilon_i}{\Delta\tau_1}. \quad (15)$$

Поэтому приращение итоговой деформации при стружкообразовании равно:

$$\Delta\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\bar{\gamma}_{zx}^2 + \lambda^2}, \quad (16)$$

где $\bar{\gamma}_{zy}$ - деформация относительного сдвига.

По определению деформация относительного сдвига равна:

$$\bar{\gamma}_{zy} = \left| \frac{\Delta v_\tau}{v_n} \right|, \quad (17)$$

где: Δv_τ - разрыв касательной компоненты скорости; v_n - нормальная скорость на границе разрыва скоростей, которой в нашем случае является плоскость сдвига.

С учетом формул (4), (5), (6), (7), (8), (9) и (16) можно записать уравнения для приращения итоговой деформации при стружкообразовании (в двух вариантах):

$$\Delta\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{[ctg\beta_1 + tg(\beta_1 - \gamma_1)]^2 + \lambda^2}, \quad (18)$$

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \gamma_1} \sqrt{\left(\zeta_1 + \frac{1}{\zeta_1} - 2 \sin \gamma_1 \right)^2 + \lambda^2}. \quad (19)$$

Уравнения содержат неизвестные параметры: угол сдвига β_1 или однозначно с ним связанную скорость схода стружки ζ_1 . Эти параметры невозможно задать, они устанавливаются самопроизвольно в зависимости от условий резания.

Через переднюю поверхность подводится не вся мощность, а только мощность, расходуемая на пластическую деформацию в плоскости сдвига, преодоление сил трения на контакте с передней поверхностью, а также мощность вязкого разрушения, связанная с образованием новых поверхностей. Таких поверхностей две: обработанная поверхность и наружная поверхность стружки.

Соответствующие уравнения энергетического баланса имеют следующий вид:

в терминах силы резания-

$$\frac{\Delta \dot{A}_{1z}}{v} = \Delta P_{1z} = \Delta P_\varepsilon + \Delta P_1^\mu, \quad (20)$$

в терминах давления резания –

$$\frac{\Delta \dot{A}_z}{St\sigma} = \Delta q_z = \Delta q_p + q_1^u. \quad (21)$$

Долю давления резания, связанную с пластической деформацией в плоскости сдвига, определяем через соответствующую мощность пластической деформации.

В соответствии с теорией течения в общем случае работа пластической деформации упрочняемого материала равна интегралу по деформации.

$$\bar{A}_\varepsilon = \int_\varepsilon \sigma_s \cdot W d\varepsilon, \quad (22)$$

где: $\bar{A}_\varepsilon$ - работа пластической деформации;

$\sigma_s = f(\bar{\varepsilon})$ - сопротивление пластическому деформированию или истинный предел текучести;

W - скорость приращения деформируемого объема упрочнения (1) это уравнение упрощается и принимает вид:

$$\dot{A}_\varepsilon = \sigma_s^* \Delta \bar{\varepsilon} \cdot \dot{W}, \quad (23)$$

$$\sigma_s^* = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2} = \sigma_0 \left(1 + B \frac{\Delta \varepsilon_1}{2} \right), \quad (24)$$

$$\dot{W} = f_t v = Stv, \quad (25)$$

где: $\dot{A}_\varepsilon$ - мощность пластической деформации;

σ^* - средняя (по слою сдвига) величина истинного предела текучести;

σ_0 и σ_1 - истинные пределы текучести обрабатываемого материала перед плоскостью сдвига и после ее пересечения;

$\dot{W}$ - скорость съема срезаемого материала (расход через плоскость сдвига);

$\Delta \bar{\varepsilon}_1$ - приращение деформации при пересечении плоскости сдвига;

f_t - сечение срезаемого слоя;

S - подача на один проход;

t - глубина резания.

С учетом (24) и (25) мощность деформации при стружкообразовании равна:

$$\dot{A}_\varepsilon = \sigma_0 \left(1 + B \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{2} \right) \Delta \bar{\varepsilon} \cdot f_t v. \quad (26)$$

Разделив обе части выражения на $\nu \sigma_0 f_t$, получаем:

$$\frac{\Delta \dot{A}_\varepsilon}{\nu \sigma_0 St} = \Delta q_{\varepsilon 1} = \left(1 + B \frac{\Delta \varepsilon_1}{2} \right) \Delta \bar{\varepsilon}_1. \quad (27)$$

Здесь $\Delta q_{\varepsilon 1}$ - доля давления, связанная с пластической деформацией сдвига.

Мощность и давление, связанные с образованием новых поверхностей

В процессе резания непрерывно образуются, по крайней мере, две новых поверхности: наружная поверхность стружки и обработанная поверхность. Скорость схода стружки меньше скорости резания, соответственно скорость приращения наружной поверхности стружки меньше скорости приращения обработанной поверхности.

Суммарная скорость приращения новых поверхностей по определению равна:

$$\dot{F}_{on} + \dot{F}_1 = (1 + \zeta_1) v \sum b_i. \quad (28)$$

Здесь $\dot{F}_{on}$ - скорость приращения обработанной поверхности; $\dot{F}_1$ - скорость приращения наружной поверхности стружки; b_i - проекция активной части режущей кромки инструмента на основную плоскость; v - скорость резания; ζ_1 - относительная скорость схода стружки.

Затраты мощности на образование этих поверхностей определяем, используя показате-

тель ударной вязкости, под которым понимают отношение работы, затраченной на разрушение надрезанного образца при испытании на ударную вязкость к сечению в месте разрушения.

$$a_n = \frac{\Delta A_p}{f_p}, \quad (29)$$

где: a_n - ударная вязкость;

ΔA_p - работа, затраченная на разрушение;

f_p - сечение в месте вязкого разрушения образца.

Откуда находим:

$$\Delta A_p = a_n f_p. \quad (30)$$

Соответственно мощность, расходуемая на вязкое разрушение, связанное с непрерывным образованием новых поверхностей, равна:

$$\Delta \dot{A}_p = a_n \dot{f}_p, \quad (31)$$

где: $\dot{f}_p$ - скорость приращения площади разрушенного сечения.

При разрушении надрезанного образца образуются две одинаковых поверхности, поэтому сечение, по которому образец разрушается, вдвое меньше суммы вновь образующихся поверхностей. Рассуждая подобным образом, записываем уравнение для скорости приращения разрушенного сечения как полу-сумму вновь скоростей образующихся поверхностей:

$$\dot{f}_p = \frac{\dot{F}_1 + \dot{F}_{on}}{2}.$$

Исходя из (28) получаем:

$$\dot{f}_p = \frac{1+\zeta}{2} v \sum b_i \quad (32)$$

Здесь $\dot{f}_p$ - скорость приращения виртуального разрушаемого сечения в месте отделения стружки от тела заготовки.

Подставляя полученную величину в выражение (31), получаем:

$$\dot{A}_p = a_n v \frac{1+\zeta}{2} \sum b_i \quad (33)$$

где: $\dot{A}_p$ - мощность вязкого разрушения, связанного с образованием новых поверхностей при образовании стружки;

a_n - ударная вязкость обрабатываемого материала;

$\sum b_i$ - суммарная длина проекции активных частей режущих кромок на основную плоскость;

v - скорость резания.

Разделив обе части уравнения на произведение $\sigma S t v$, получаем уравнение для доли давления резания, расходуемой на вязкое разрушение.

$$\Delta q_p = a_p \frac{\sum b_i}{\sigma S t} v \frac{1+\zeta}{2}. \quad (34)$$

Мощность сил трения на передней поверхности по определению равна:

$$\dot{A}_1^u = T_1 v_1, \quad (35)$$

где: T_1 - сила трения на передней поверхности; $v_1 = v \zeta$ - скорость схода стружки

На основании схемы, представленной на рис. 2, находим:

$$T_1 = \Delta P_{z1} \frac{\sin \rho}{\cos(\gamma - \rho)}, \quad (36)$$

где: $\rho = \arctg \mu$ - угол трения;

μ - коэффициент трения;

ΔP_{z1} - доля силы резания, подводимая через переднюю поверхность.

С учетом формулы (36) перепишем уравнения для мощности трения на передней поверхности $\dot{A}_1^\mu$ и связанной с ней доли силы резания Δq_1^μ :

$$\dot{A}_1^\mu = \Delta P_{z1} C_p \zeta V, \quad (37)$$

$$\Delta P_1^\mu = \Delta P_{z1} C_p \zeta, \quad (38)$$

$$C_p = \frac{\sin \rho}{\cos(\gamma + \rho)}. \quad (39)$$

Здесь ΔP_{z1} - доля силы резания, подводимая через переднюю поверхность; C_p - приведенный коэффициент контактного трения на передней поверхности.

Вся сила, подводимая через переднюю поверхность, равна:

$$\Delta P_{z1} = \Delta P_\varepsilon + \Delta P_1^\mu + \Delta P_p. \quad (40)$$

С учетом (38) можно записать:

$$\Delta P_{z1} = \Delta P_\varepsilon + \Delta P_{z1} C_p \zeta + \Delta P_p.$$

Этой силе соответствует давление

$$\Delta q_{z1} = \Delta q_\varepsilon + \Delta q_{z1} C_p \zeta + \Delta q_p. \quad (41)$$

Откуда находим долю давления резания, подводимую через переднюю поверхность:

$$\Delta q_{z1} = \frac{\Delta q_\varepsilon + \Delta q_p}{1 - C_p \zeta}. \quad (42)$$

Или в частично развернутом виде

$$\Delta q_{z1} = \frac{\left(1 + B \frac{\Delta \varepsilon}{2}\right) \Delta \varepsilon + \frac{a_n \sum b_i (1 + \zeta)}{2 \sigma S t}}{1 - C_p \zeta}. \quad (43)$$

Скорость схода и так называемая «усадка» стружки.

В развернутом виде полученное уравнение (43) содержит неизвестный параметр ζ_1 , ответственный за скорость схода стружки, который невозможно назначить, так как он устанавливается самопроизвольно в зависимости от условий резания. Однозначно он определяется либо экспериментально через так называемую «усадку стружки», либо аналитически – из условия минимума мощности, силы или давления резания, подводимых через переднюю поверхность инструмента.

В терминах давления резания это условие имеет вид

$$\frac{d(\Delta q_{z1})}{d\zeta_1} = 0. \quad (44)$$

Дифференцирование этого полностью развернутого выражения дает уравнение четвертой степени, решение которого сопряжено с определенными техническими проблемами. Для преодоления их применяем итерационный подход, переписываем уравнение, вводя следующие обозначения:

$$K = \left(1 + B \frac{\Delta \varepsilon}{2}\right), \quad M = \frac{a_n \sum b_i}{2 \sigma S t}, \quad E = \frac{K}{\sqrt{3} \cos \gamma}$$

$$\Delta q_{z1} = \frac{E(\zeta + 1/\zeta - 2 \sin \gamma) + M(1 + \zeta)}{1 - C_p \zeta} \quad (45)$$

Дифференцируя это новое уравнение, после несложных преобразований получаем квадратное уравнение:

$$\zeta^2 + b\gamma - C = 0 \quad (46)$$

Здесь обозначено:

$$C = \frac{E}{E + M \cdot (1 + C_p) - 2 \cdot C_p \cdot \sin \gamma}; \quad b = 2 \cdot C_p \cdot C.$$

Решая, находим интересующее нас значение корня

$$\zeta_1 = -\frac{b}{2} + \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + C}. \quad (47)$$

С этим значением ζ_1 цикл вычислений повторяется.

Двух шагов оказывается достаточно для обеспечения точности в пределах третьего знака. Были составлены программы расчета в среде Mathcad, и с полученными значениями параметров оптимизации ζ вычислены и углы сдвига β_1 , приращения деформации, доли давления резания, также сила, подводимая через переднюю поверхность при резании проходным токарным резцом.

В расчетах принимались следующие параметры инструмента и условий резания:

$$\varphi = 45; \quad \varphi_1 = 6; \quad t = 3.5; \quad S = 0.25; \quad \sigma = 40; \quad B = 0.46; \quad \mu = 0.12.$$

Результаты расчета параметров на основе аналитических зависимостей приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Значения параметров резания, вычисленные аналитически.

γ	λ	μ	ζ	ε	β_1	Δq_{z1}	$P_{z1, \text{кГс}}$
-20	5	0.12	0.638	1.177	24.26	3.375	141.734
-15	5	0.12	0.635	1.629	26.17	3.088	129.676
-10	5	0.12	0.633	1.500	28.17	2.843	119.412
-5	5	0.12	0.632	1.384	30.28	2.633	110.57
0	5	0.12	0.632	1.278	32.52	2.449	102.874
5	-5	0.12	0.633	1.181	34.80	2.289	96.124
10	-5	0.12	0.634	1.092	37.35	2.147	90.160
15	-5	0.12	0.637	1.009	39.96	2.021	84.866
20	-5	0.12	0.641	0.932	42.73	1.908	80.152
25	-5	0.12	0.645	0.86	45.60	1.808	75.954
30	-5	0.12	0.650	0.792	48.68	1.720	72.73

Таким образом, уравнения, полученные на основе энергетического метода анализа, позволяют моделировать акт стружкообразования как установившийся процесс непрерывного пластического деформирования упрочняемого материала. Существенно, что все уравнения являются физическими. Это позволяет использовать их в качестве основы для разработки методики расчета процессов резания.

Литература

1. Развитие науки о резании металлов. Колл. авт. под ред. Н.Н. Зорева. – М.: Машиностроение, 1967.
2. Грановский Г.И., Грановский Б.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1995.
3. Оленин Л.Д. К анализу механики стружкообразования. В сб. Избранные труды МНТК ААИ 39 «Приоритеты развития отечественного автостроения и подготовка инженерных кадров». Электронное изд. на CD, 2003.
4. Чудаков П.Д., Коробкин В.Д. Определение мощности пластической деформации на поверхности разрыва скоростей в упрочняющемся материале // Разработка и исследование технологических процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение. 1968. с. 34...42.