

ков в требуемом направлении – в направлении навинчивания роликов на деталь.

Величина рабочей аксиальной подачи накатывающих роликов за каждый оборот роликов составляет:

$$S_a = \pi \cdot D_u \cdot \sin \alpha,$$

где: D_u – диаметр накатывающих роликов, по которому происходит обкатка роликов и детали (диаметр центроид);

α – разница в углах подъема резьбы роликов и детали.

Согласно приведенной зависимости величина рабочей аксиальной подачи роликов вдоль оси детали составляет за каждый оборот роликов

$$S_a = 3,14 \cdot 44,38 \cdot \sin 20' = 0,81 \text{ мм.}$$

В результате, согласно исходным нормативным данным, количество оборотов роликов за цикл их тангенциальной подачи составляло 23 оборота. Следовательно, величина общего осевого перемещения накатывающих роликов за период их тангенциальной подачи составляет: $\Sigma S_{ат} = 0,81 \cdot 23 = 18,63$ мм. На эту величину $\Sigma S_{ат}$ накатывающие ролики предварительно смещаются в осевом направлении относительно торца детали. А затем через 23 оборота роликов, когда достигается совпадение торцов роликов и детали, тангенциальная подача роликов выключается. В этот момент, при необходимости, включается осевая подача суппорта станка S_a и происходит дальнейшее накатывание резьбы по всей длине детали.

Использование рассмотренного способа накатывания резьбы расширяет технологические возможности процесса накатывания тангенциальными резьбонакатными головками. При этом способе тангенциальными головками можно накатать на детали резьбовую поверхность большой длины, которая не ограничивается шириной резьбовой части роликов, как это имеет место при традиционной тангенциальной накатке. Одновременно путем расчета требуемого диаметра, а следовательно, и угла наклона резьбы накатывающих роликов обеспечивается возможность управления величиной и направлением рабочей аксиальной подачи накатывающих роликов, что позволяет учитывать конкретные технологические условия осуществления процесса обработки.

Литература

1. Хостиков М.З. Управление геометрией инструмента в процессе обработки. Ж. Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва, 2011 г., № 4, с. 319-321.
2. Хостиков М.З., Темников В.А., Телегина О.А. Технология накатывания винтовых поверхностей на валах. Сборник научных трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении», М., МГГУ, 2011, с.80-83.

К анализу механики резания цилиндрическим сверлом с перемычкой

д.т.н. проф. Оленин Л.Д.
МГТУ «МАМИ»
(495) 223-05-23, доб. 1232

Аннотация. В статье излагаются результаты аналитического исследования механики процесса образования цилиндрического отверстия в сплошном материале вращающимся инструментом. Анализ выполнен энергетическим методом с использованием экстремальных положений механики деформирования при следующих допущениях: обрабатываемый материал считается изотропным, обладающим деформационным упрочнением, что соответствует условиям полной холодной деформации. Кроме того, принято, что контактное трение подчиняется закону Кулона, то есть пропорционально нормальному давлению на контакте, а кривая упрочнения на выделенном участке аппроксимирована линейной функцией. Исследованы два варианта резания: инструментом с перемычкой, имеющей отрицательный передний угол и инструментом с исправленной перемычкой. По-

казано, что традиционное сверло с перемычкой не является эффективным инструментом. Оптимизация геометрии перемычки обеспечивает многократное уменьшение осевой силы. Приводятся физические уравнения для расчета силовых параметров сверления с учётом фактической геометрии режущей части инструмента, а также его центральной части, называемой перемычкой.

Ключевые слова: механика резания цилиндрическим сверлом, математическая модель процесса

Основные обозначения, принятые в тексте:

σ – истинный предел текучести обрабатываемого материала;

$\sigma_{1,2,3}$ – истинные пределы текучести упрочненного материала стружки в зонах основного лезвия и лезвий на перемычках;

B – коэффициент, отражающий склонность обрабатываемого материала к деформационному упрочнению;

a_n, a_p – ударная вязкость и удельная работа распространения зародившейся трещины;

μ – коэффициент Кулонова трения;

$\Delta\varepsilon_{1,2,3}$ – приращения итоговой деформации при стружкообразовании основным лезвием и лезвиями на перемычках;

$\bar{\gamma}_{z\theta}$ и $\bar{\gamma}_n$ – деформации относительного сдвига в плоскости $Z\theta$ и в плоскости резания;

D – диаметр сверла;

C – ширина направляющей ленточки;

ω – угол подъема винтовой линии;

φ – главный угол в плане;

$\lambda_{1,2,3}$ – углы наклона главных режущих кромок в зонах основного лезвия, лезвий на классической и исправленной перемычках;

$\gamma_{1,2,3}$ – главные передние углы основного лезвия и лезвий на перемычках;

$\alpha_{1,2,3}$ – главные задние углы основного лезвия и лезвий на перемычках;

v – скорость резания;

v_1, v_2, v_3 – скорости схода стружки в зоне основного лезвия, в зонах классической и исправленной перемычек;

$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ – относительные скорости схода стружки (в долях от скорости резания);

$\bar{\gamma}_{\theta Z}, \bar{\gamma}_n$ – деформации относительного сдвига в плоскости θZ и в плоскости резания;

$\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2, \Delta\varepsilon_3$ – приращения обобщённой деформации при стружкообразовании в зонах основного лезвия и лезвиях на перемычках;

$C_\mu(\rho)$ – приведенный коэффициент трения;

$\Delta q_{\varepsilon_1}, \Delta q_{\varepsilon_2}, \Delta q_{\varepsilon_3}$ – доли давления резания, связанные с пластической деформацией в зоне основного лезвия и зонах перемычек;

$\Delta q_1^\mu, \Delta q_2^\mu, \Delta q_3^\mu$ – доли давления резания, связанные с преодолением сил трения на передних поверхностях основного лезвия и лезвий на перемычках;

$\Delta q_{p_1}, \Delta q_{p_2}, \Delta q_{p_3}$ – доли давления резания, связанные с образованием новых поверхностей в зонах резания основным лезвием и лезвиями на перемычках;

$\sum P, \sum M$ – полные осевая сила и момент;

$P_{z1,2,3}$ – осевые составляющие сил, подводимые через передние поверхности основных лез-

вий и лезвий на классической и исправленной перемычках;

$M_{1,2,3}$ – моменты от сил, подводимые через передние основные лезвия и лезвия на перемычках.

Процесс образования отверстия в сплошном материале цилиндрическим сверлом с перемычкой рассматривается в работе как резание вращающимся инструментом с несколькими парами лезвий, когда непрерывность процесса обеспечивается осевой подачей. Каждая пара лезвий состоит из основного лезвия с главной и вспомогательной режущими кромками, а лезвия на перемычке вспомогательной кромки не имеют. Но и они, несмотря на необычно большие отрицательные передние углы, не выглаживают поверхность, а тоже срезают стружку. При этом все кинематические углы резания изменяются вдоль режущих кромок инструмента в соответствии со следующими уравнениями:

$$\lambda_1 = \frac{e}{\rho} \quad (1)$$

$$\gamma_1 = \arctg\left(\varpi \frac{\rho}{R \cdot \cos \lambda_1 \cdot \sin \varphi}\right) + \frac{Sz}{2\pi\rho} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \alpha_R - \frac{Sz}{2\pi\rho} \quad (3)$$

$$\lambda_2 = 0 \quad (4)$$

$$\gamma_2 = \frac{Sz}{2\pi\rho} - \varphi \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \varphi + \frac{Sz}{2\pi\rho} \quad (6)$$

Используется энергетический метод анализа и разрывные поля скоростей. Обрабатываемый материал считается изотропным, обладающим деформационным упрочнением, что соответствует условиям полной холодной деформации. Кроме того, принято, что контактное трение подчиняется закону Кулона, поэтому в зоне резания основным лезвием трение пропорционально нормальному давлению, а на контакте с перемычкой, где процесс резания реализуется при высоких давлениях, достигает предельной для деформируемого (обрабатываемого) материала величины, которая согласно условию пластичности М. Губера – Р. Мизеса [4] равна:

$$\tau_p = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Анализ резания основными лезвиями и лезвиями на перемычке выполнен при допущении, что и скорость резания (v) и скорости схода стружки (v_1, v_2 и v_3) прямо пропорциональны расстоянию до оси, а скорости схода стружки (ζ_1, ζ_2 и ζ_3) приняты равными некоторому среднему для каждого лезвия значению.

Резание основным лезвием выполняется с переменным по длине лезвия наклоном главной режущей кромки, поэтому деформация при стружкообразовании реализуется в двух плоскостях: в плоскости $Z\theta$ и в плоскости резания Pn , а итоговая деформация (в стружке) равна [2]:

$$\Delta \bar{\epsilon}_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\bar{\gamma}_{\theta Z}^2 + \bar{\gamma}_n^2} \quad (8)$$

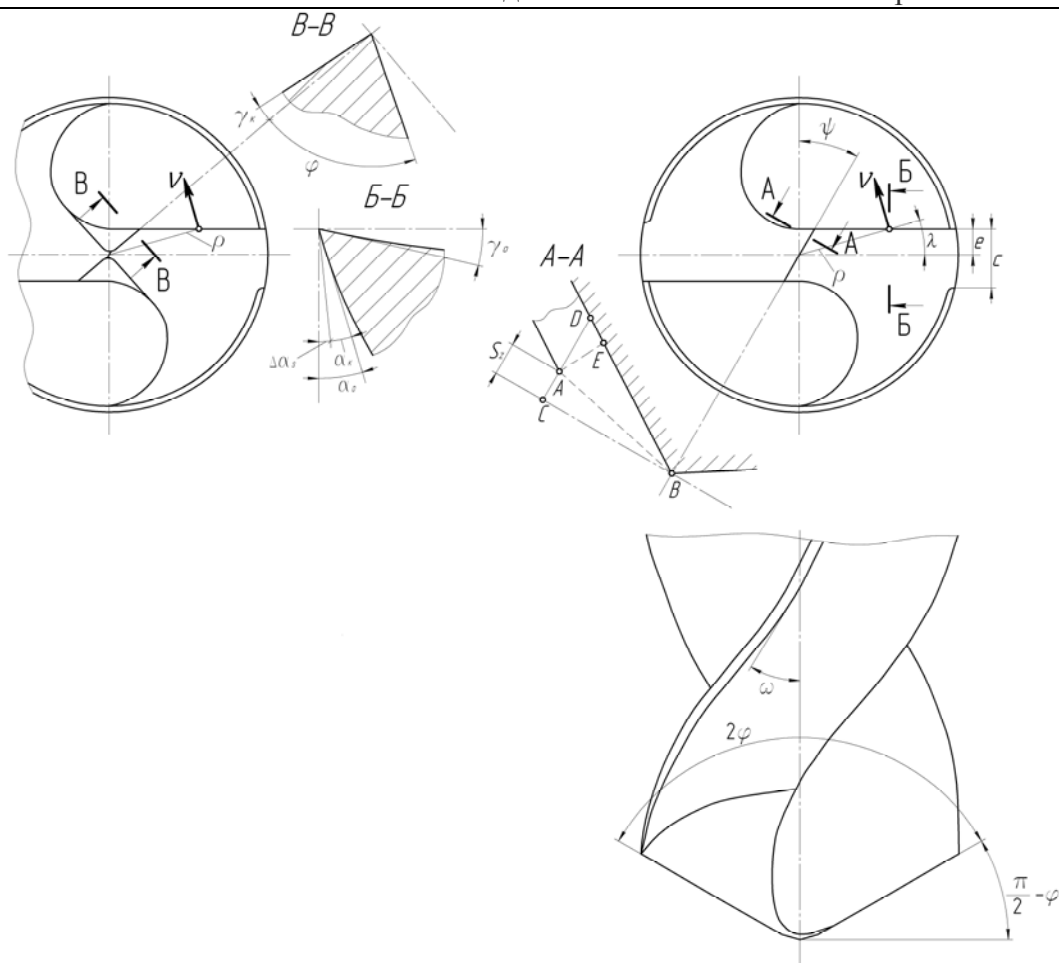


Рисунок 1 – К анализу резания сверлом с перемычкой

Схема резания и поле скоростей в плоскости θy приведены на рисунке 2.

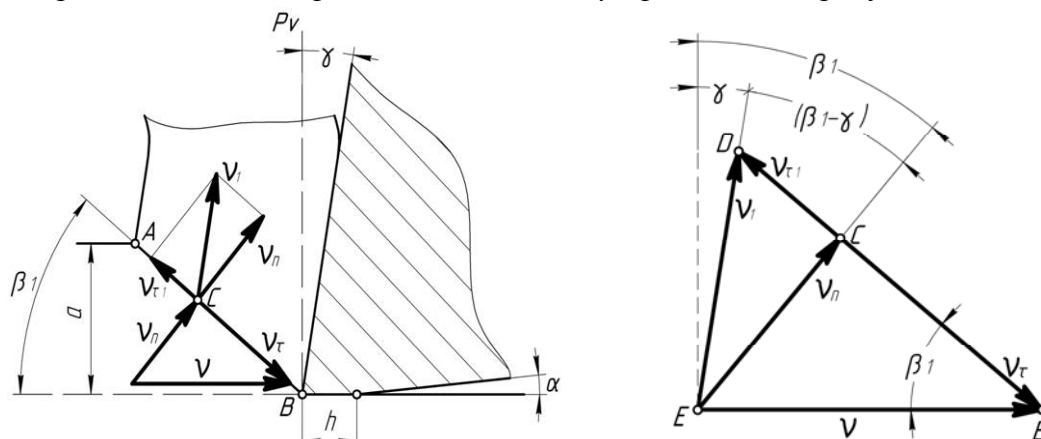


Рисунок 2 – Поле скоростей в плоскости $Z\theta$ остро заточенного основного лезвия

Поле скоростей, а также итоговые деформации сдвига в плоскости $Z\theta$ (рисунок 2) и в плоскости резания (P_n) описываются следующими уравнениями:

$$v_1 = \frac{v}{\cos \beta_1}, \quad (9)$$

$$v_n = v \sin \beta_1, \quad (10)$$

$$v_\tau = v \cos \beta_1, \quad (11)$$

$$v_{\tau 1} = -v_n \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma_1), \quad (12)$$

$$\bar{\gamma}_{\theta z} = \left| \frac{v_{\tau 1} - v_{\tau}}{v_n} \right| = \zeta_1 + \frac{1}{\zeta_1} - 2 \sin \gamma_1, \quad (13)$$

$$\zeta_1 = \frac{v_1}{v} = \frac{\sin \beta_1}{\cos(\beta_1 - \gamma_1)}, \quad (14)$$

$$\bar{\gamma}_n = \operatorname{tg} \lambda_1 \approx \lambda_1. \quad (15)$$

Уравнение для итоговой деформации в стружке в зоне основных лезвий получено подстановкой её компонентов из (13) и (15) в уравнение (8):

$$\Delta \varepsilon(\rho) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \gamma_1} \sqrt{\left(\zeta_1 + \frac{1}{\zeta_1} - 2 \sin \gamma_1\right)^2 + \operatorname{tg}^2 \lambda_1 \cos^2 \gamma_1}. \quad (16)$$

Уравнение для доли давления резания, подводимого через переднюю поверхность основного лезвия записано как для случая косоугольного резания острозаточенным инструментом [2]:

$$\Delta q_{z1}(\rho) = \frac{\Delta q_{\varepsilon 1}(\rho) + \Delta q_{p1}}{1 - C_{\mu}(\rho) \zeta_1}, \quad (17)$$

$$\Delta q_{z1} = \left(1 + B \frac{\Delta \varepsilon(\rho)}{2}\right) \Delta \varepsilon(\rho), \quad (18)$$

$$\Delta q_{p1} = \frac{a_p \cdot (1 + \zeta_1)}{2 \sigma S_z}, \quad (19)$$

$$C_{\mu}(\rho) = \frac{\sin \mu}{\cos(\gamma_1 - \mu)}. \quad (20)$$

Соответственно момент и осевая сила, связанные с силами, подводимыми через передние поверхности основных лезвий, равны интегралам вдоль режущей кромки по $d\rho$:

$$M_1(\zeta_1) = z \cdot \sigma \cdot S_z \int_{R_j}^R q_1(\zeta_1, \rho) \rho d\rho \quad (21)$$

$$P_{z11}(\zeta_1) = -z \cdot \sigma \cdot S_z \int_{R_j}^R q_1(\zeta_1, \rho) C_{\mu}(\rho) \cdot \cos(\gamma_1(\rho)) d\rho \quad (22)$$

Осевая сила на площадках износа по задним поверхностям основных лезвий (P_{3z}), и **момент от сил трения** на этих площадках (M_{3z}) определены по нормальному давлению (q_3^n), которое принято равным давлению на пуансоне при его вдавливании в полупространство [5]:

$$q_3^n = \frac{1 + \frac{\pi}{2}}{1 - 1.36\mu}. \quad (23)$$

Ширина площадки износа (h_3) принята пропорциональной скорости резания:

$$h_3 = h_3^R \frac{\rho}{R}. \quad (24)$$

Соответствующие осевая сила и момент вычислялись как интегралы:

$$P_{3z} = q_3^n \sigma \int_{R_o}^R h_3 d\rho = z \sigma h_{13} \frac{R^3 - R_o^3}{R^2}, \quad (25)$$

$$M_3^{\mu} = z \mu \sigma q_3^n h_3^K \int_{R_o}^R \frac{\rho^2}{R} d\rho = 3 \mu \sigma \cdot z h_{13} \frac{R^4 - R_o^4}{4 R^2}. \quad (26)$$

Резание перемычкой. Практический интерес представляют два варианта: резание классической перемычкой с главным передним углом $\gamma_2 = -\varphi$, (А-А, рисунок 1) и резание «исправленной» перемычкой с передним углом $\gamma_2 = \gamma_k$ (В-В, рисунок 1) В обоих случаях резание осуществляется без наклона главной режущей кромки, то есть так называемое ортогональное резание ($\lambda = 0$).

Резание классической перемычкой это резание лезвием с изменяющимся вдоль режущей кромки кинематическим передним углом, равным $\gamma_2 = \frac{S}{2\pi\rho} - \varphi$. Уравнение мощности, подводимой через переднюю поверхность перемычки, записано в терминах давления резания:

$$\Delta q_2 = \Delta q_2^\varepsilon + \Delta q_2^\mu + \Delta q_{p2}. \quad (27)$$

В анализе стружкообразования использована плоская схема с единой плоскостью сдвига, при которой приращение интенсивности деформаций равно [1]:

$$\Delta\varepsilon_2 = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \cos \gamma_2} \left(\zeta_2 + \frac{1}{\zeta_2} - 2 \sin \gamma_2 \right). \quad (28)$$

Соответствующая доля давления резания принята равной:

$$\Delta q^{\varepsilon_2} = \left(1 + B \frac{\Delta\varepsilon_2}{2} \right) \Delta\varepsilon_2, \quad (29)$$

где: γ_2 – главный передний угол;

ζ_2 – относительная скорость схода стружки в зоне перемычки.

Трение на контакте с передней поверхностью перемычки (τ_2) принято предельным для деформированного материала стружки, $\left(\frac{\sigma_2}{\sqrt{3}} \right)$, а длина контакта с инструментом принята равной отрезку BD (рисунок 1):

$$BD = \frac{S_z}{\cos \varphi} \left(1 + \frac{1}{\zeta_2 \cdot \sin \varphi} \right). \quad (30)$$

При этом условии определены мощность сил трения на выделенном элементе передней поверхности и соответствующая ей доля давления резания:

$$d\dot{A}_2^\mu = BE \cdot \frac{\sigma_2}{\sqrt{3}} \cdot v_2 \cdot d\rho, \quad (31)$$

$$\Delta q_2^\mu = \frac{(1 + B\Delta\varepsilon_2)}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi} \left(\zeta_2 + \frac{1}{\sin \varphi} \right). \quad (32)$$

Здесь $\sigma_2 = \sigma(1 + B\Delta\varepsilon_2)$ – истинный предел текучести упрочненного материала стружки в зоне перемычки.

В процессе резания перемычкой образуются полоска обработанной поверхности и полоска наружной поверхности стружки. На это расходуется мощность, пропорциональная удельной работе распространения трещины и скорости приращения разрушаемого сечения [2].

Уравнение для доли давления резания, связанного с образованием новых поверхностей в зоне перемычки, записано по аналогии с уравнением (19).

$$\Delta q_{p2} = \frac{a_p(1 + \zeta_2)}{2\sigma \cdot S_z}. \quad (33)$$

Суммированием результатов (29), (32) и (33) получено уравнение для доли давления резания, подводимого через перемычку.

$$q_2 = (1 + B \frac{\Delta \varepsilon_2}{2}) \Delta \varepsilon_2 + \frac{1 + B \Delta \varepsilon_2}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi} (\zeta_3 + \frac{1}{\sin \varphi}) + \frac{a_p \eta_2 (1 + \zeta_2)}{2 \sigma \cdot S_z}. \quad (34)$$

Уравнения для момента и осевой силы на передней поверхности перемычки записаны по аналогии с уравнениями (21) и (22):

$$M_2(\zeta_2) = z \sigma S_z \int_{0j}^{R_0} q_2(\zeta_2 \rho) \rho d\rho. \quad (35)$$

$$P_{z_2}(\zeta_2) = -z \sigma S_z \int_{Rf}^R q_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot d\rho. \quad (36)$$

Резание исправленной перемычкой (рисунок 1, В-В) характеризуется более благоприятной геометрией, чем резание классической перемычкой, обусловлено это тем, что главный кинематический передний угол (γ_3) существенно больше соответствующего угла классической перемычки, но этот угол увеличивается с уменьшением расстояния до оси сверла:

$$\gamma_3 = \frac{S}{2\pi\rho} + \gamma_k, \quad \lambda_3 = 0. \quad (37)$$

Уравнения для расчета силовых параметров записаны по аналогии с уравнениями (17), (18), (19), (20), (21) и (22):

$$\Delta q_{z_3} = \frac{\Delta q_{\varepsilon_3}(\rho) + \Delta q_{P_3}}{1 - C_{\mu_3}(\rho) \zeta_3}, \quad (38)$$

$$\Delta \varepsilon_3 = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \cos \gamma_3} (\zeta_3 + \frac{1}{\zeta_3} - 2 \sin \gamma_3), \quad (39)$$

$$\Delta q_{P_3} = \frac{a_p \cdot (1 + \zeta_3)}{2 \sigma S_z}, \quad (40)$$

$$C_{\mu_3}(\rho) = \frac{\sin \mu}{\cos(\gamma_3 - \mu)}, \quad (41)$$

$$M_3(\zeta_3) = \sigma S \int_0^{R_0} q_3(\zeta_3) d\rho, \quad (42)$$

$$P_{z_{31}}(\zeta_3) = \sigma S \int_0^{R_0} q_3(\zeta_3, \rho) C_{\mu_3}(\rho) \cdot \cos(\gamma_3(\rho)) d\rho. \quad (43)$$

Результатирующие осевую силу и необходимый крутящий момент определяли суммированием их составляющих. При этом параметры резания вычислялись как для случая сверления инструментом с классической перемычкой, так и для сверла с исправленной перемычкой.

Для варианта сверла с классической перемычкой использовали уравнения:

$$P = P_{1Z} + P_{13Z} + P_{2Z}, \quad (44)$$

$$M = M_1 + M_{3\mu} + M_2. \quad (45)$$

Параметры сверления инструментом с исправленной перемычкой вычисляли, используя уравнения:

$$P = P_{1Z} + P_{13Z} + P_{3Z}, \quad (46)$$

$$M = M_1 + M_{3\mu} + M_3. \quad (47)$$

Для тестовых расчетов составлены программы в среде Mathcad 14. Тестовые расчеты выполнялись при следующих значениях постоянных параметров инструмента и обрабатываемого материала: $\varphi_1 = 0.001$; $\omega = 30^\circ$; $\alpha_{ZR} = 15^\circ$; $D = 20$; $e = 2$; $S = 0.2$; $z = 2$; $\gamma_k = -5^\circ$; $\sigma = 40 \text{ кг/мм}^2$; $B = 0.423$; $A_p = 16 \text{ кг/мм}$; $\mu = 0.1$.

Некоторые характерные результаты приведены на рисунках.

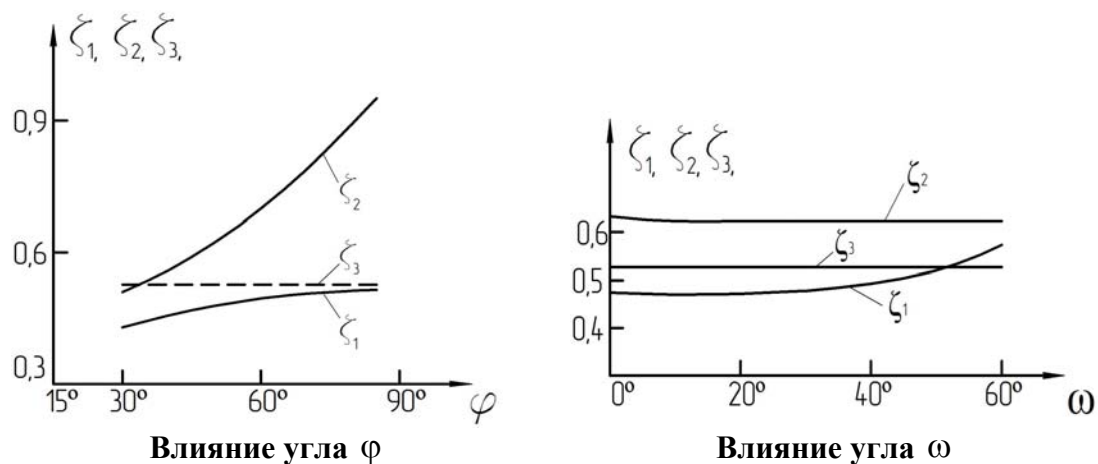


Рисунок 3 – Влияние геометрии режущей части на скорости схода стружки в зоне резания основными лезвиями (ζ_1), в зоне резания классической перемычкой (ζ_2) и в зоне резания «исправленной» перемычкой (ζ_3)

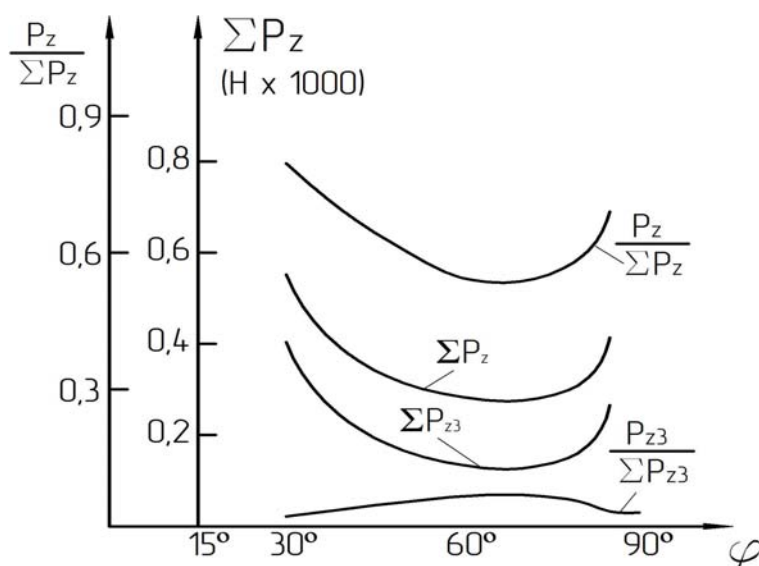


Рисунок 4 – Влияние угла φ на результирующую осевую силу, а также на осевые силы, действующие на классической и на исправленной перемычках

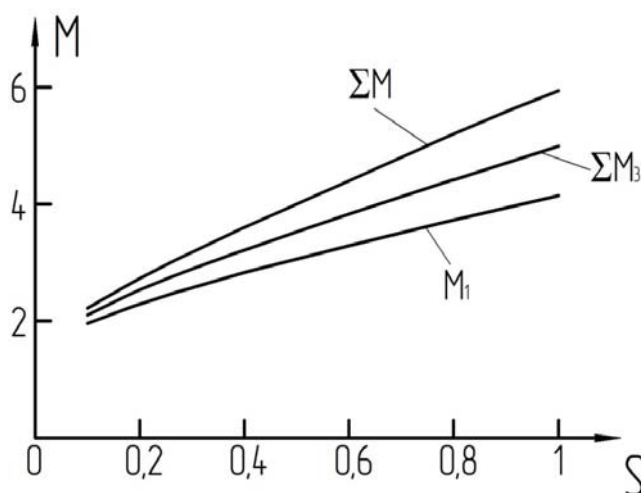


Рисунок 5 – Влияние подачи на суммарный момент и его составляющие

На рисунке 5: $\sum M$ – суммарный крутящий момент на сверле; M_1 – момент, подводимый через передние поверхности основного лезвия; $\sum M_3$ – момент от сил на площадках износа по задним поверхностям.

Заключение

Анализ результатов тестовых расчетов показал, что предложенная аналитическая модель качественно отражает основные особенности процесса образования отверстия в сплошном материале сверлом с перемычкой. В частности установлено, что на скорости схода стружки или, как принято говорить, её «продольную усадку» в зонах резания основными лезвиями и перемычкой главный угол в плане φ оказывает решающее влияние. Вместе с тем на «усадку стружки» в зоне резания исправленной перемычкой угол φ не влияет. Влияние угла подъёма винтовой линии не столь существенно.

Установлено также, что каждого материала существует интервал значений угла φ , в котором осевые силы при сверлении имеют минимальное значение. Кроме того, вычисления подтверждают установленный экспериментально факт: на долю перемычки приходится основная часть осевой силы. В тоже время за счет «исправления» переднего угла перемычки осевую силу при сверлении можно уменьшить во много раз.

На основании изложенного можно сделать заключение, что физические уравнения, полученные на основании предложенной аналитической модели, могут использоваться в качестве основы для разработки методик расчета процессов сверления.

Литература

1. 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.
2. Оленин Л.Д.. К анализу механики резания упрочняемого материала. Стружкообразование. Известия МГТУ «МАМИ» № 1(5) 2008. с. 183-190.
3. Оленин Л.Д.. К анализу механики резания. Резание инструментом с притупленной режущей кромкой. Известия МГТУ «МАМИ», № 2(8) 2009. с. 144-152.
4. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия 1980.
5. Оленин Л.Д. О контактных напряжениях при внедрении плоского и скругленного пуансона в полупространство. Материалы Международного научного симпозиума. М.: МГТУ МАМИ 2005.