

УДК 621.95

Статический прочностной расчет сверл со сменными многогранными пластинами методом конечных элементов

Каюшин Егор Сергеевич kay.yegor@internet.ru

Шуляк Ян Игоревич shulyak.yan@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния сверл со сменными многогранными пластинами с использованием метода конечных элементов. Для снижения вычислительных и временных затрат применен статический анализ вместо динамического, обеспечивающий достаточную точность прогноза прочностных характеристик. Нагрузки в расчетной модели заданы на основе удельных сил резания, определенных по методу теории подобия С.С. Силина. Разработанная методика позволяет на этапе проектирования оценивать прочность и жесткость конструкции, выявлять наиболее нагруженные зоны инструмента и проводить сравнительный анализ различных геометрий сверл. Сделан вывод о возможности практического применения методики для оптимизации конструкции сверл и расширения ее на иные типы режущего инструмента.

Ключевые слова: сверло со сменными многогранными пластинами, прочностной расчет, статический расчет, метод конечных элементов, удельные силы резания, сверление, силы при сверлении.

Static strength analysis of drills with index able inserts using the finite element method

Kayushin Egor Sergeevich kay.yegor@internet.ru

Schulyak Yan Igorevich shulyak.yan@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article proposes a method for calculating the stress-strain state of drills with indexable inserts using the finite element method. To reduce computational and time costs, static analysis is employed instead of dynamic one, which provides sufficient accuracy in predicting strength characteristics. The loads in the computational model are defined based on specific cutting forces determined using S.S. Silin's similarity theory. The developed approach makes it possible, at the design stage, to evaluate the strength and stiffness of the drill structure, identify the most highly loaded zones of the tool, and perform a comparative analysis of different drill geometries. It is concluded that the proposed methodology can be practically applied for optimizing drill designs and extended to other types of cutting tools.

Keywords: indexable insert drill, structural analysis, static calculation, finite element method, specific cutting forces, drilling, drilling forces

Введение. Сверла со сменными многогранными пластинами (СМП) широко применяют в металлообработке благодаря высокой износостойкости и воз-

возможности быстрой замены режущих пластин. Тенденция роста производительности обработки обуславливает увеличение нагрузок на инструмент и требований к его качеству и надежности.

Важным этапом проектирования современного режущего инструмента, в том числе сборных сверл с СМП, является прочностной расчет. Разработка новых методик прочностного анализа режущего инструмента, позволяющих снизить вычислительные и временные затраты, остается актуальной задачей. Несмотря на высокую точность методов явной динамики, их применение для оценки прочности часто избыточно из-за сложности моделей материалов и высоких требований к вычислительным ресурсам. В данной работе предложен метод прочностного расчета сверл, основанный на статическом анализе напряженно-деформированного состояния.

Одной из проблем решения задач прочности при разработке режущего инструмента является определение нагрузок на расчетную модель. Нагрузки обычно устанавливают на основе значений сил резания, которые могут быть либо измерены экспериментально, либо рассчитаны. Для расчета сил резания предложен метод, основанный на использовании удельных сил резания и применении метода подобия по С.С. Силину.

Целью данной работы является разработка методики расчета сверл на прочность, требующей меньшей вычислительной мощности за счет использования статического анализа и обеспечивающей достаточную для инженерных расчетов точность.

Материалы и методы. Расчет выполняют в несколько этапов. Сначала задают исходные данные: условия работы сверла, геометрию режущей части, свойства заготовки и режимы резания. Разрабатывают трехмерную модель. Далее определяют удельные силы резания и размеры контактных площадок для задания нагрузок на инструмент. Подготавливают расчетную модель с граничными условиями и конечно-элементной сеткой, затем проводят расчет напряженно-деформированного состояния сверла. Результаты анализируют для выявления критических зон и оценки прочностных характеристик инструмента.

Разработанная методика апробирована при прочностном расчете сборного сверла с частичным перекрытием режущих пластин (рис. 1, а). Сверло снабжено двумя режущими пластинами, расположенными с перекрытием. Диаметр сверла составляет 16 мм. Требовалось провести проверку сверла на прочность при обработке деталей из стали марки 45. Подача на оборот $S_0 = 0,25$ мм. Частота вращения шпинделя $n = 2000$ об/мин. Режущие пластины изготовлены из твердого сплава. Диаметр вписанной окружности пластины равен 5,4 мм. Передний угол γ_c на пластине определен формой ее передней поверхности и составляет 25° . Задний угол на пластине $\alpha_c = 11^\circ$. Пластины смещены на величину $b = 0,4$ мм (рис. 1, б).

Для задания нагрузок на сверло определили силы резания, действующие на контактные площадки режущих пластин. Расчет сил резания выполняли с использованием математической модели удельной силы, основанной на методе подобия, предложенном Силиным С.С. [1]. Этот метод требует построения функции угла сдвига $\Phi(y)$ от координаты y (рис. 1, б):

$$\Phi_i(y) = \arctg \frac{m_i \cdot Pe(y)^{n_i}}{F^{k_i} \cdot D^{p_i} \cdot (1 - \sin(\gamma_c))^{q_i}}, \quad (1)$$

где Pe — критерий Пекле, F — критерий, отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов, D — характеризующий геометрию сечения срезаемого слоя; n_i, k_i, p_i, q_i — показатели степеней, определяемые по критериям подобия [1].

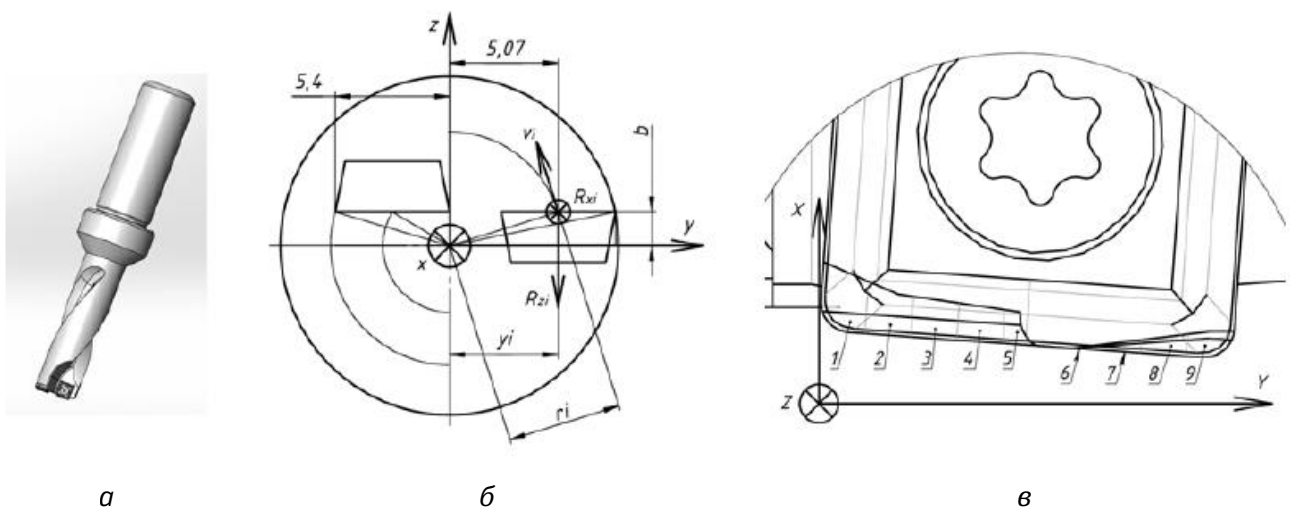


Рис. 1. Сверло с СМП (а), расчетные схемы (б) и (в)

Из-за различных условий резания на разных участках режущей кромки критерии подобия принимают различные значения. Это приводит к тому, что на графике $\Phi(y)$ имеется излом (рис. 2). Для формализации расчета значения $\Phi(y)$ были аппроксимированы полиномиальной функцией:

$$\Phi(y) = -1,48528 \cdot 10^{10} y^4 + 3,32092 \cdot 10^8 y^3 - 2,67949 \cdot 10^6 y^2 + 10379,7 y + 13. \quad (2)$$

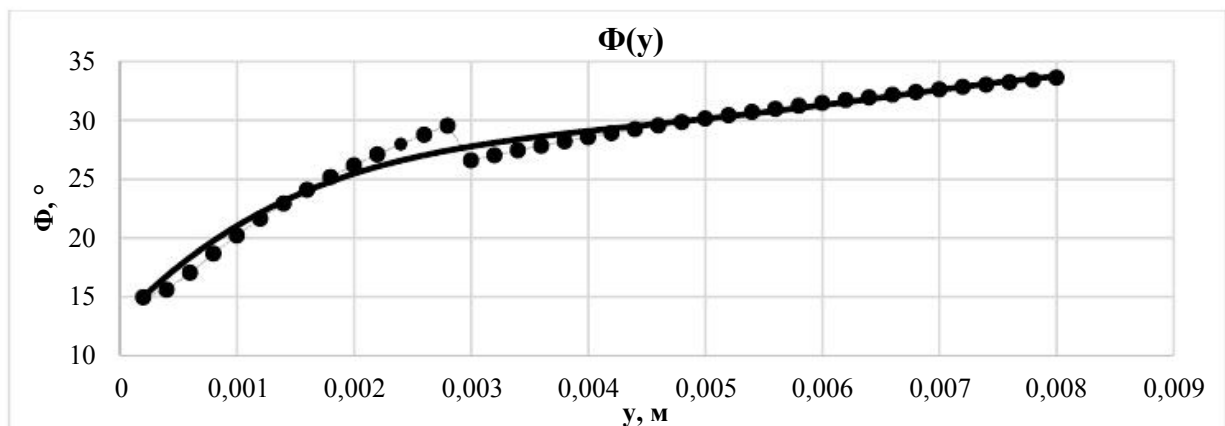


Рис. 2. Зависимость угла сдвига Φ от координаты y

Далее были определены формулы для расчета составляющих удельных сил резания $R_{hz}(y)$ и $R_{hx}(y)$, имеющих следующий вид:

$$R_{hz}(y) = k_{sots} \cdot \tau_p \cdot a_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}(\Phi(y))} \right); \quad (3)$$

$$R_{hx}(y) = k_{sots} \cdot \tau_p \cdot a_c \cdot \left(\frac{1}{\operatorname{tg}(\Phi(y))} - 1 \right), \quad (4)$$

где k_{sots} — коэффициент влияния СОТС на силу резания [3]; τ_p — предел прочности стали на срез, МПа. При этом было сделано допущение, что составляющие сил резания лежат в плоскости нормальной к главной режущей кромке в рассматриваемой точке.

За ширину площадок контакта принята длина зоны пластического контакта l_0 [1] стружки и режущей пластины (рис. 3):

$$l_0(y) = \frac{1}{2} \cdot a_c \cdot 1,45 \cdot \left[\frac{\cos(\gamma_c) + \sin(\gamma_c)}{\operatorname{arctg}(\Phi(y))} - \cos(\gamma_c) + \sin(\gamma_c) \right], \quad (5)$$

где a_c — толщина срезаемого слоя, мм.

Срезаемый слой неравномерен (рис. 1, в). В связи с этим режущая кромка была разделена на девять участков, для каждой из которой были определены размерные параметры и координаты центров площадок для определения удельных сил.

Подготовка твердотельной модели сверла к расчету (рис. 4) включала в себя разбиение на конечные элементы (КЭ) и задание граничных условий. Силы резания были приложены в виде дискретных нагрузок к участкам, моделируя контакт инструмента с материалом заготовки. Аналогичный подход к приложению нагрузок был использован в работе [2]. В зоне приложенных нагрузок размер КЭ был равен 0,125 мм. Для уменьшения времени расчета на удалении от приложенных нагрузок размеры КЭ укрупнялись.

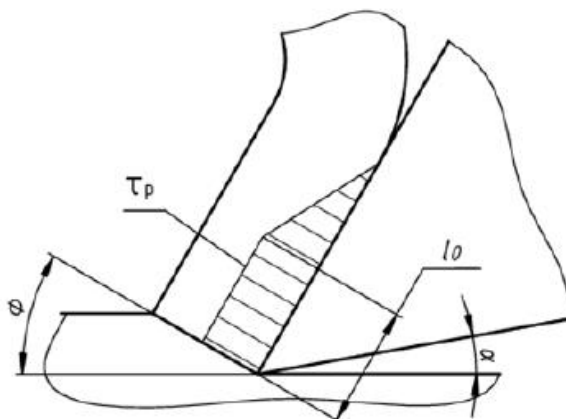


Рис. 3. Длина площадок контакта



Рис. 4. Сетка элементов (а), приложенная нагрузка (б)

Результаты и обсуждение. В результате расчета были получены эпюры перемещений и напряжений в корпусе инструмента и режущих пластинах (рис. 5). Для корпуса инструмента рассчитывали эквивалентные напряжения по критерию фон Мизеса, который позволяет оценивать прочность пластичных материалов, таких как сталь. Для режущей пластины из хрупкого материала применяли критерий максимального нормального напряжения, учитывающий разрушение твердых сплавов при превышении предела прочности на растяжение или сжатие.

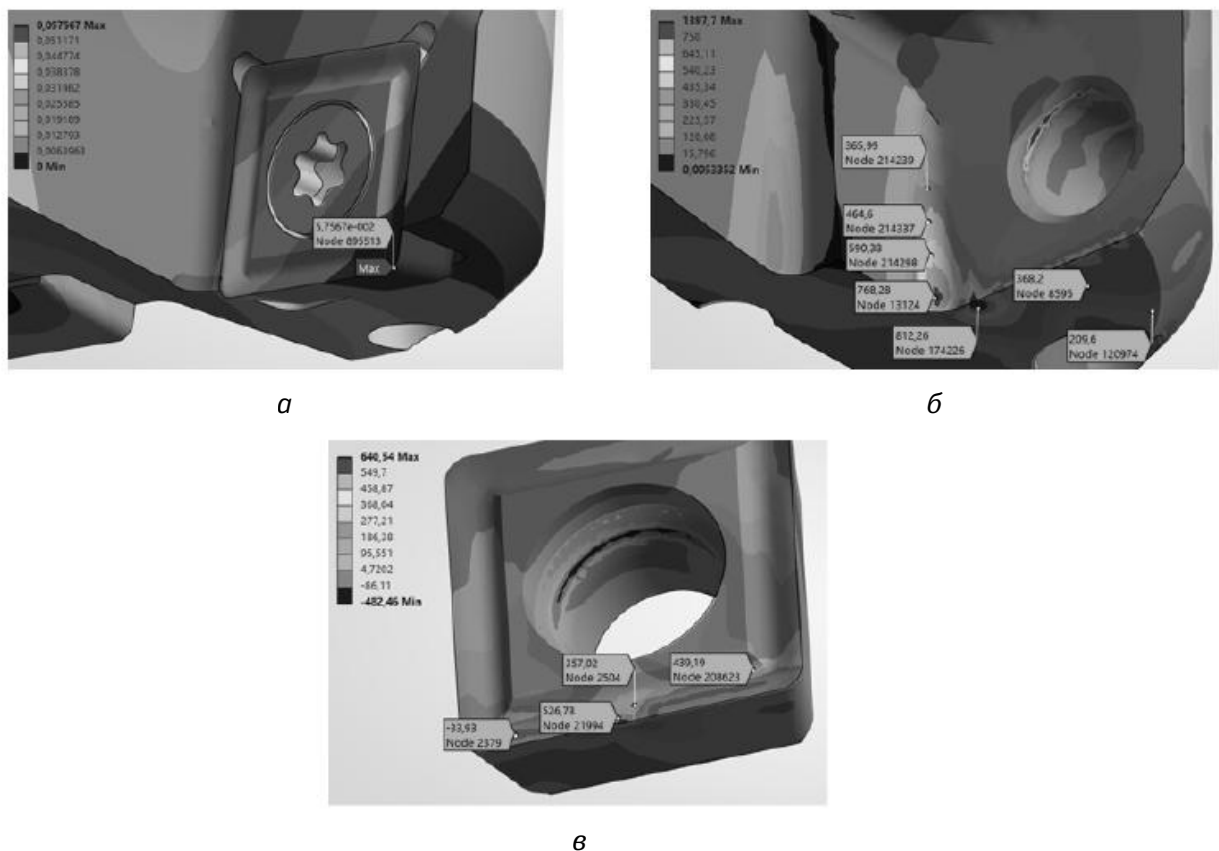


Рис. 5. Суммарные перемещения, мм (а); эквивалентные напряжения, МПа (б); главные напряжения, МПа на периферийной пластине (в)

По полученным картам напряжений выявляют наиболее нагруженные элементы конструкции, а по картам перемещений оценивают сдвиг пластин в пазах и увод сверла. Выявлены концентраторы напряжений в пазах режущих пластин. В них напряжения приближаются к пределу текучести материала. Напряжения в узлах пластины не выходят за пределы прочности на растяжение твердого сплава. Смещение крайней точки периферийной пластины, которое также определяет расчет, влияет на разбивку отверстия.

Заключение. Разработана и апробирована методика прочностного расчета сверл с СМП, основанная на статическом анализе напряженно-деформированного состояния. Применение метода подобия позволило определить удельные силы резания расчетным путем, исключив трудоемкие измерения. Результаты моделирования показали, что напряжения в корпусе сверла остаются ниже предела текучести материала, а напряжения в режущих пластинах не превышают прочности твердого сплава. Разработанный метод позволяет выявлять критические зоны, требующие внимания при проектировании и выборе геометрии инструмента. Предложенный подход обеспечивает достаточную точность для инженерных расчетов и снижает вычислительные затраты по сравнению с методами явной динамики.

Список источников

- [1] Силин С.С. *Метод подобия при резании материалов*. Москва, Машиностроение, 1979, 152 с.
- [2] Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х., Нозирзода Ш.С. Анализ конструкции сборного сверла со сменными многогранными пластинами. *Механики XXI века*, 2017, № 16, с. 44–51.
- [3] Новиков В.В. Анализ контактных явлений при лезвийном резании металлов и смазочное действие СОТС. *Металлообработка*, 2015, № 1 (85), с. 13–20.