

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-42-50

УДК 621.9.042

С. Г. ПОЛТОРАЦКИЙ

В. М. ШЕМЕНКОВ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГРАННЫХ ОТВЕРСТИЙ СПЕЦИАЛЬНЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Аннотация

Представлены результаты имитационного моделирования процесса резания различных материалов при формировании профиля гранных отверстий различной гранности специальным осевым инструментом.

Ключевые слова:

траектория, гранное отверстие, сила резания, крутящий момент.

Для цитирования:

Полторацкий, С. Г. Моделирование процесса формирования гранных отверстий специальным осевым инструментом / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 42–50.

Введение

Расчет сил резания и построение схемы действия данных сил является важной частью расчета инструмента на точность и прочность. Без этих данных невозможно дать адекватную оценку процессам, протекающим в зоне обработки, и, следовательно, планировать получение качественных поверхностей после обработки.

В зависимости от степени сложности условий, в которых совершается процесс пластического деформирования металлов при резании, и, следовательно, стружкообразование, необходимо принципиально различать два случая – свободное и несвободное резание.

При свободном резании в работе принимает участие только главная режущая кромка и все участки режущей кромки находятся в одинаковых условиях, а направления перемещения всех частиц стружки практически одинаковы [1].

Несвободное резание воспроизводится в наиболее распространенных технологических схемах обработки металлов – точении, строгании, фрезеро-

вании, зубофрезеровании, сверлении и других; характеризуется тем, что слой металла срезается несколькими режущими кромками или одной криволинейной режущей кромкой. Соответственно, зубья инструментов, работающих одновременно тремя режущими кромками, подвергаются более интенсивному износу.

При несвободном резании силу R , которая преодолевает сопротивление резанию, можно разложить на три составляющие [2]: окружную силу P_z , действующую по касательной к траектории движения режущего лезвия; радиальную P_y , действующую по радиусу инструмента; осевую силу P_x , действующую вдоль оси инструмента.

Методика проведения исследований

Специфика формирования гранных отверстий предлагаемым методом с использованием специального режущего инструмента (с выступающим зубом), где в процессе формообразования отверстия участвуют от одного до трех зубьев с различными глубинами резания [3], стандартные схемы резания не при-

менимы. Для расчета составим схему действия этих сил на инструмент для

формирования гранных отверстий [4] (рис. 1).

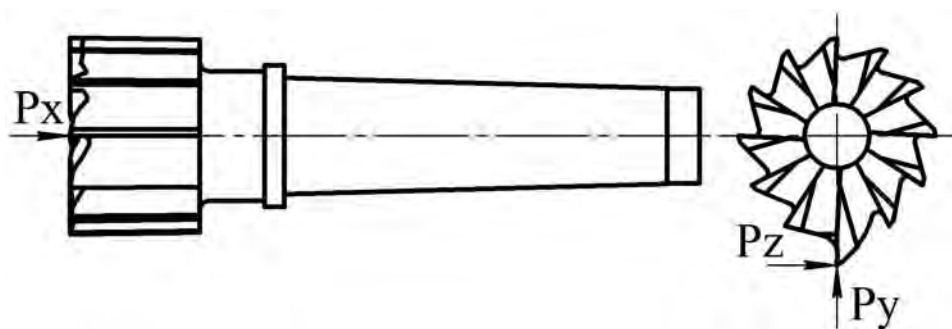


Рис. 1. Схема сил резания, действующих на инструмент при обработке

Рассчитаем силы резания, возникающие при обработке квадратного отверстия с диаметром вписанной окружности 40 мм, пользуясь технической литературой [4, 5].

Гранное отверстие возможно получить осевым инструментом сразу в сплошном материале или же предварительно получить круглое отверстие классическим способом, а далее рассверлить осевым инструментом. С технологической точки зрения предварительно полученное круглое отверстие должно быть меньше диаметра вписанной окружности обрабатываемого гранного отверстия.

При расчете стоит учесть, что при формировании гранного отверстия с предварительно просверленным отверстием силы будут действовать не на все зубья инструмента, а только на два (при обработке квадратного отверстия), которые непосредственно учувствуют в формообразовании (рис. 2). В случае с обработкой отверстий, имеющих больше четырех граней, силы будут действовать только на один зуб.

Если предварительно просверленного отверстия не будет, то в формообразовании будут участвовать все зубья.

Классическая формула расчета глубины резания t при классическом рассверливании при обработке гранных отверстий не подойдет, поэтому на ос-

новании опыта получения гранных отверстий и кинематики процесса резания расчет глубины резания будем осуществлять по эмпирической формуле.

Для первого (выступающего) зуба она будет иметь вид

$$t_1 = (0,159 \cdot (d_{вп} - 1) + 0,658) \cdot k_1, \quad (1)$$

где $d_{вп}$ – диаметр вписанной окружности обрабатываемого гранного отверстия; k_1 – коэффициент, учитывающий количество граней обрабатываемого отверстия (для квадратного отверстия $k_1 = 1$; для пятигранного – $k_1 = 0,51$; для шестигранного – $k_1 = 0,42$; для семигранного – $k_1 = 0,32$; для восьмигранного – $k_1 = 0,28$).

Для второго зуба

$$t_2 = 0,1 \cdot (d_{вп} - 1) + 0,1. \quad (2)$$

Приложим рассчитанные силы (при обработке с предварительно полученным круглым отверстием) к режущим зубьям инструмента на примере обработки квадратных отверстий согласно представленной ранее схеме (см. рис. 1) в программном комплексе Ansys Static Structural (рис. 4), зафиксировав хвостовик инструмента, имитируя тем самым закрепление его в шпинделе станка, и получим следующий результат (рис. 3).

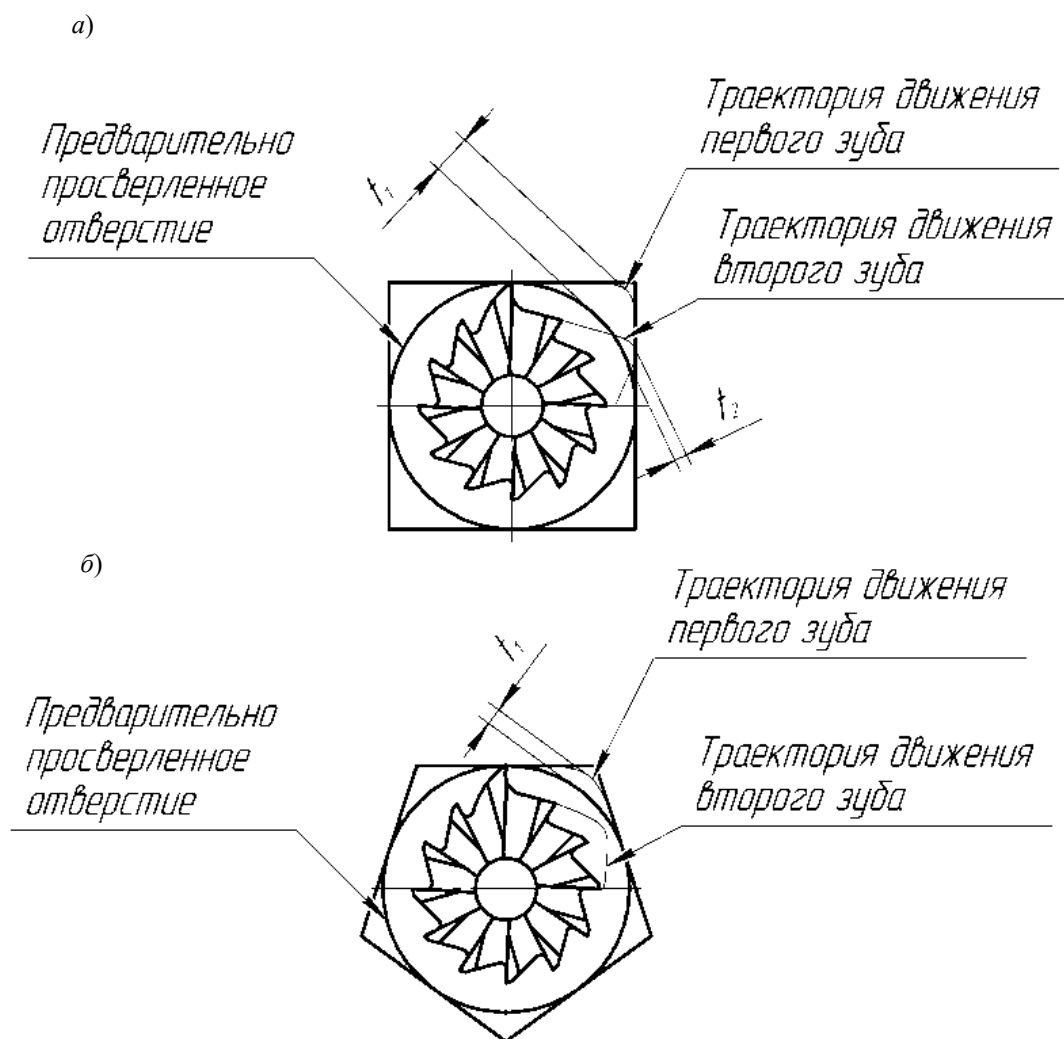


Рис. 2. Траектории движения рабочих зубьев инструмента при обработке квадратного отверстия (а) и пятигранного отверстия (б) с предварительно просверленным отверстием

В качестве хвостовика (присоединительной части) инструмента принимаем конус Морзе с резьбовым отверстием, который широко используется для концевых фрез и позволяет обеспечить надежную работу инструмента как с осевыми, так и с радиальными силами резания.

В качестве материала режущей части принимаем основную быстрорежущую сталь Р6М5 по ГОСТ 19265–73. Учитывая тот факт, что используемый программный продукт основан на стандартах ISO и не имеет в своей библиотеке указанного материала, характеризующегося определенным комплексом

эксплуатационных свойств, задаем необходимые для расчета параметры (предел текучести, модуль упругости, плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность и др.) самостоятельно, опираясь на данные [6].

Для получения полной силовой картины при формировании гранных отверстий в качестве обрабатываемых материалов принимаем конструкционную сталь 45 по ГОСТ 1050–88 в состоянии поставки (200...220 НВ), серый чугун СЧ15 по ГОСТ 1412–85 (130...240 НВ) и алюминиевого сплава Д16 по ГОСТ 4784–2019 (120...140 НВ).

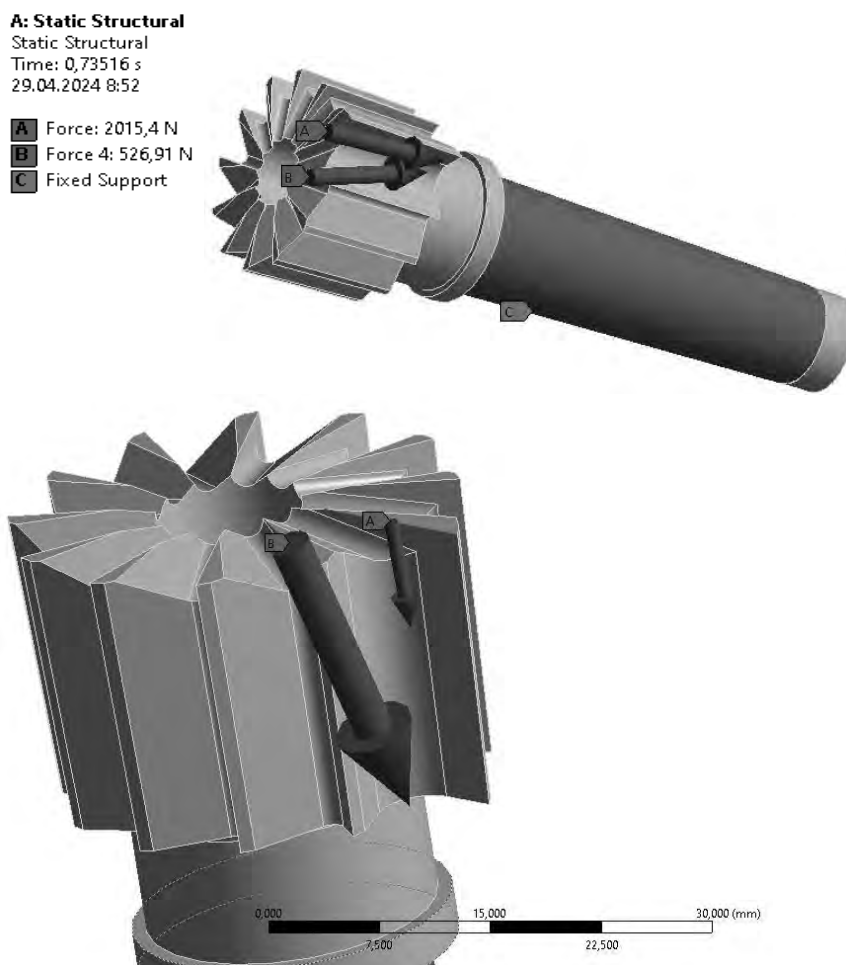


Рис. 3. Схема приложенных сил к режущим зубьям инструмента в программном продукте Ansys Static Structural при формировании квадратного отверстия с радиусом вписанной окружности 40 мм с предварительно просверленным круглым отверстием диаметром 39 мм

При моделировании процесса использовался метод конечных элементов, основанный на аппроксимации непрерывной величины, определенной бесконечным числом значений, дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе под областей, называемых конечными элементами.

В качестве конечных элементов применялся трехмерный тетраэдральный конечный элемент с размером ячейки до 0,5 мм.

Сгенерированная сетка конечных

элементов имеет различную размерность для каждого из элементов геометрической модели инструмента. Итог генерации сетки представлен на рис. 5 (69521 элементов в сетке).

Результаты моделирования

После необходимой подготовки запускаем расчет на статическую прочность при обработке алюминиевого сплава квадратного отверстия со вписанным диаметром 10 мм, результаты которого представлены на рис. 6.

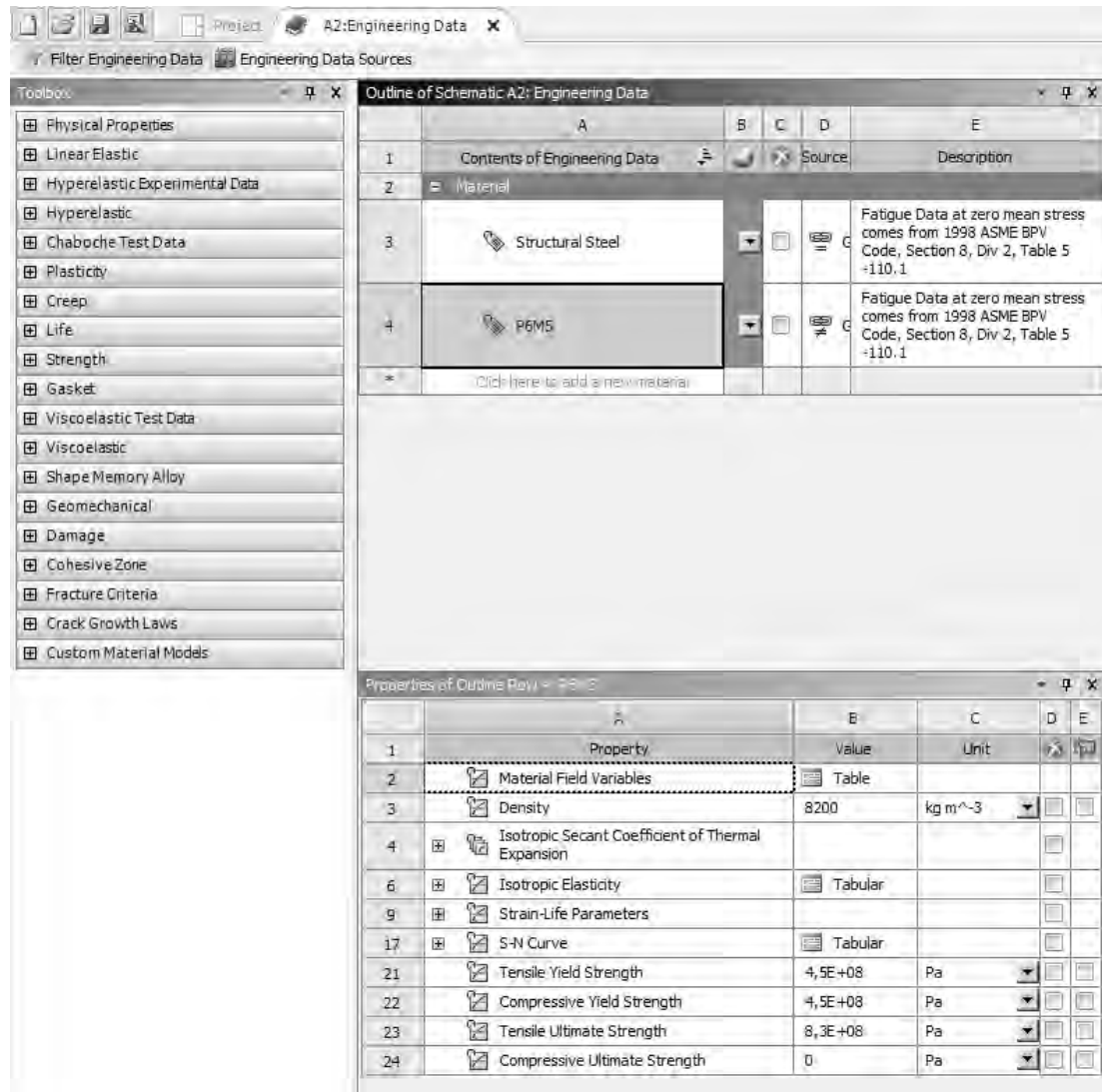


Рис. 4. Интерфейс программной системы анализа Ansys при задании свойств материала

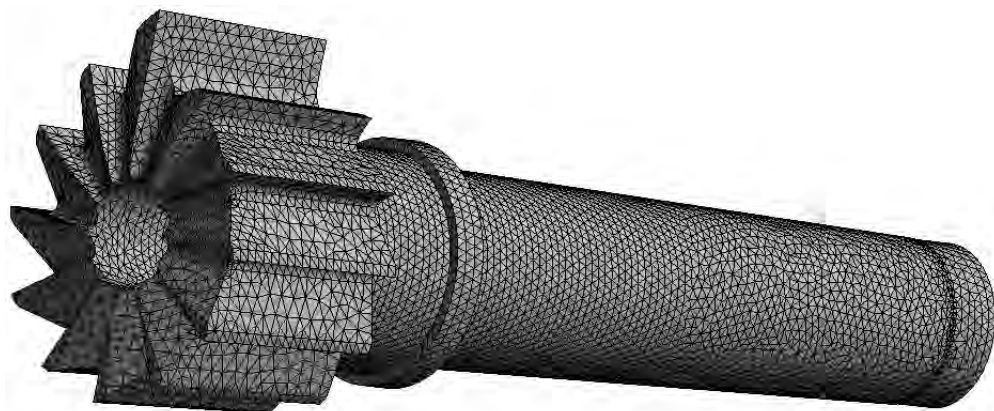


Рис. 5. Конечно-элементная модель режущего инструмента

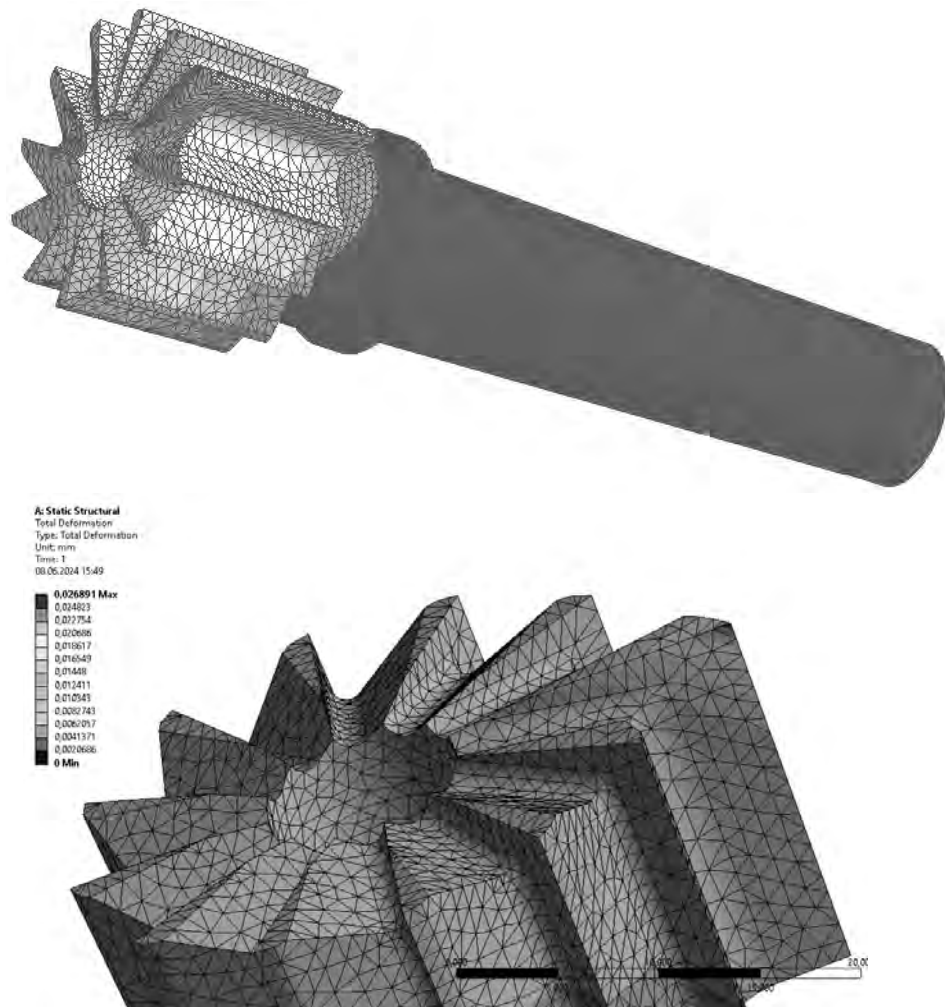


Рис. 6. Итоги компьютерной симуляции

Как видно из рисунка, в процессе обработки возможно смещение вершины рабочего (выступающего) зуба на 2 мкм под действием сил резания. Из этого можно сделать вывод, что силы, действующие на инструмент, не влияют на точность обработки по 9-му качеству вследствие достаточной прочности рабочего зуба инструмента.

Получим зависимость влияния размера обрабатываемого отверстия на смещение рабочего зуба инструмента Δ при обработке конструкционной углеродистой стали, серого чугуна и алюминиевого сплава при формировании гранного отверстия с предварительно просверленным круглым отверстием диаметром меньшим диаметра вписан-

ной окружности $d_{ВП}$ на 1 мм (рис. 7, а) и без него (рис. 7, б).

Как видно из графиков, чем больше диаметр вписанной окружности обрабатываемых отверстий, тем большие силы действуют и на инструмент, и, как следствие, большие смещения вершины рабочего зуба. Из-за того, что при формировании гранного отверстия без предварительно просверленного отверстия зубьями снимается больше материала, силы резания значительно возрастают и, как следствие, возрастает величина смещения рабочего формообразующего зуба инструмента, что приводит к значительному снижению точности обработки гранного отверстия.

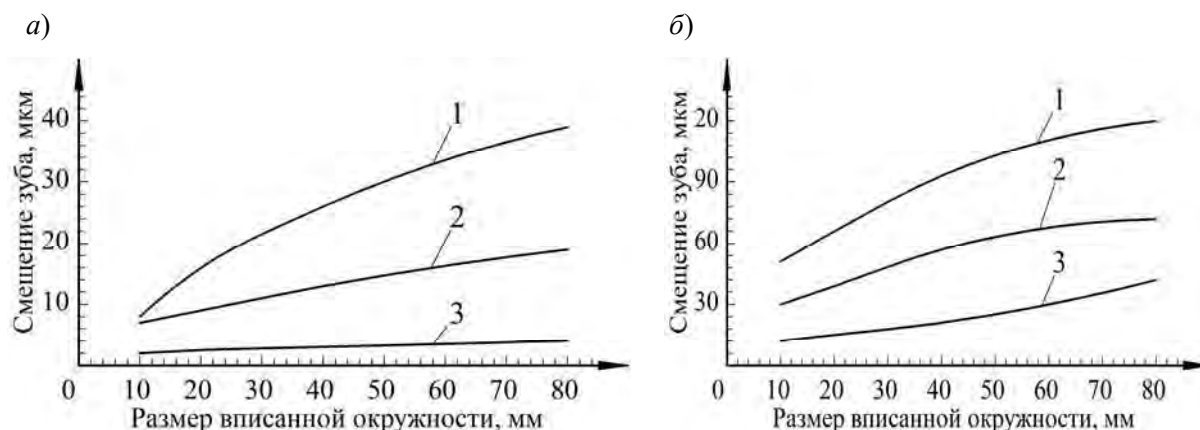


Рис. 7. Влияние размера вписанной окружности $d_{ВП}$ обрабатываемого четырехгранного отверстия на смещение рабочего зуба инструмента Δ при обработке конструкционной углеродистой стали 1, серого чугуна 2 и алюминия 3 при формировании гранного отверстия как с предварительно просверленным круглым отверстием (а), так и при обработке без него (б)

Аналогичная картина наблюдается при формировании шестигранного отверстия тем же инструментом (рис. 8).

Стоит отметить, что предварительно просверленное отверстие при формировании шестигранного отверстия приводит к значительному снижению сил резания. При формировании шестигранного отверстия в сплошном металле силы резания, как и смещение режущей кромки, находятся в таких же пределах, как и при формировании квадратного отверстия.

Также важным фактором, возникающим во время механической обработки, является крутящий момент и мощность резания, от значения которых напрямую зависит выбор технологического оборудования. Составим таблицу возникающих при обработке квадратных отверстий крутящих моментов и мощностей резания (табл. 1) и сопоставим эти значения с техническими характеристиками некоторых фрезерных станков.

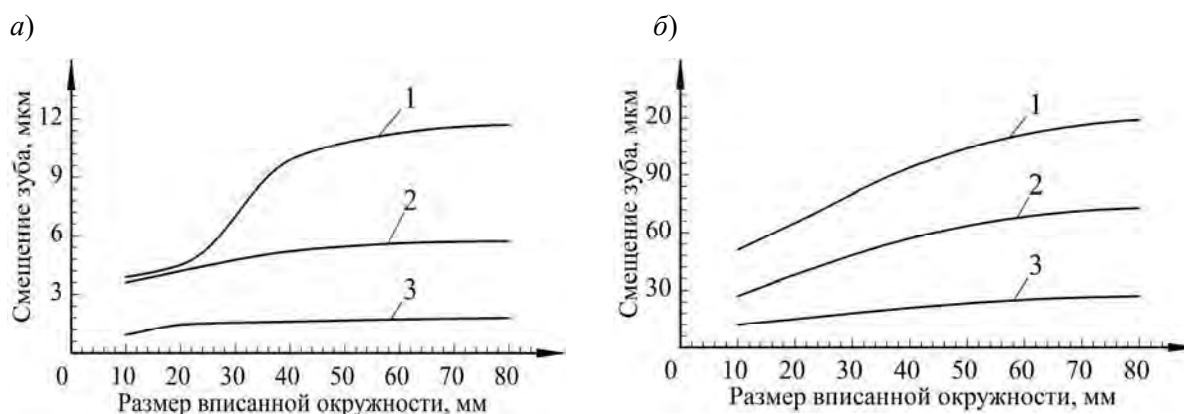


Рис. 8. Влияние размера вписанной окружности $d_{ВП}$ обрабатываемого шестигранного отверстия на смещение рабочего зуба инструмента Δ при обработке конструкционной углеродистой стали 1, серого чугуна 2 и алюминия 3 при формировании гранного отверстия как с предварительно просверленным круглым отверстием (а), так и при обработке без него (б)

Табл. 1. Расчетные значения мощности резания и крутящего момента, возникающих при обработке квадратных отверстий с предварительно просверленным отверстием и без него*

Диаметр вписанной окружно- сти $d_{вп}$, мм	Гранное отверстие							
	квадратное				шестигранное			
	с предварительно просверленным отверстием		без предварительно просверленного отверстия		с предварительно просверленным отверстием		без предварительно просверленного отверстия	
	Мощность резания, кВт	Крутящий момент, Н·м	Мощность резания, кВт	Крутящий момент, Н·м	Мощность резания, кВт	Крутящий момент, Н·м	Мощность резания, кВт	Крутящий момент, Н·м
Сталь 45								
10	0,066	1,48	0,215	4,8	0,025	0,45	0,215	4,8
20	0,100	7,13	0,336	23,97	0,042	2,54	0,336	23,97
40	0,170	38,5	0,551	124,64	0,077	14,87	0,551	124,64
80	0,265	195,57	0,790	582,84	0,124	78,97	0,790	582,84
Чугун СЧ15								
10	0,019	0,98	0,055	2,82	0,007	0,3	0,055	2,82
20	0,036	4,35	0,118	14,32	0,015	1,55	0,118	14,32
40	0,077	21,39	0,272	75,86	0,035	8,26	0,272	75,86
80	0,145	102,78	0,507	358,72	0,068	41,5	0,507	358,72
Алюминиевый сплав Д16								
10	0,009	0,26	0,037	1,09	0,004	0,1	0,037	1,09
20	0,013	1,14	0,062	5,45	0,007	0,48	0,062	5,45
40	0,022	5,55	0,114	28,36	0,012	2,51	0,114	28,36
80	0,031	25,01	0,164	132,63	0,017	11,75	0,164	132,63
Примечание – * – значения носят справочный характер и предназначены для демонстрации тенденции изменения крутящего момента и мощности резания для конкретных условий обработки и могут отличаться от значений, полученных экспериментальным путем								

Как видно из результатов расчета, при обработке гранных отверстий без предварительно просверленного отверстия гранность отверстия не оказывает влияния на крутящий момент и мощность резания и, напротив, предварительно просверленное отверстие значительно снижает указанные параметры.

На основании полученных значений крутящего момента и мощности резания можно подобрать оборудование для формирования отверстий необходимого размера и типа.

Так, например, исходя из данных, представленных основными производителями фрезерных станков, максимальный крутящий момент для стан-

ка ГФ2171NC составляет 615 Н·м, а допустимая мощность резания – 11 кВт, для станка DMTG VDLS600 соответственно 35,8 Н·м и 5,6 кВт.

Заключение

На основании моделирования процесса резания при получении гранных отверстий специальным осевым режущим инструментом как с предварительно просверленным отверстием, так и без него, показано, что данный способ может быть реализован на серийно выпускаемых фрезерных станках с ЧПУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / С. А. Рубинштейн [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1968. – 392 с.

2. **Ящерицын, П. И.** Теория резания: учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.: ил.
3. Осевой инструмент и способ формирования гранного отверстия: пат. ВУ 24308 / В. М. Шеменков, С. Г. Полторацкий, М. А. Рабыко. – Опубл. 20.06.2024.
4. **Полторацкий, С. Г.** Формирование гранных отверстий осевым вращающимся инструментом / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2. – С. 14–22.
5. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 656 с.: ил.
6. **Гузеев, В. И.** Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: справочник / В. И. Гузеев, И. Ф. Гущин, В. А. Батуев; под ред. В. И. Гузеева. – Москва: Машиностроение, 2005. – 368 с.
7. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – Москва: Машиностроение, 2003. – 784 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 30 июля 2024 года

Контакты:

poltos17@gmail.com (Полторацкий Сергей Григорьевич);
vshemenkov@yandex.by (Шеменков Владимир Михайлович).

S. G. PALTARATSKI, V. M. SHEMENKOV

MODELING THE PROCESS OF FORMING FACETED HOLES WITH A SPECIAL AXIAL TOOL

Abstract

The paper presents the results of simulation modeling of the process of cutting faceted holes in different materials using a special axial tool to form the faceted hole profile of different facetedness.

Keywords:

trajectory, faceted hole, cutting force, torque.

For citation:

Paltaratski, S. G. Modeling the process of forming faceted holes with a special axial tool / S. G. Paltaratski, V. M. Shemenkov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 42–50.