

УДК 621.914

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-4-18-27

И.Н. Сединин, В.Ф. Макаров

ВЫБОР МАРКИ СПЛАВА, ПОКРЫТИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЗАКАЛЁННОЙ СТАЛИ 95Х18-Ш

Предложено производить окончательную обработку плоской поверхности с высокой твёрдостью деталей из закалённых сталей торцевым фрезерованием. Представлен новый научный подход в определении порядка выбора режущей пластины и её характеристик. Определена адекватная эмпирическая модель шероховатости обработанной поверхности и сделана оценка тесноты связи переменных при одно- и двухфакторном влиянии на параметр оптимизации. Математическая модель

позволила спроецировать гиперповерхности и диаграммы функции в зависимости от переменных факторов, которые определили оптимальные режимы резания для обеспечения качества поверхности и снижения себестоимости механической обработки.

Ключевые слова: сталь, торцевое фрезерование, сплав, покрытие, микрогеометрия, режущая кромка, вершина.

I.N. Sedinin, V.F. Makarov

CHOICE OF ALLOY, COATING AND GEOMETRICAL PARAMETERS OF CUTTER PLATE FOR FACE MILLING OF HIGH-CARBON HARDENED 95H18-Sh STEEL

The application of hardened steel parts for the purpose of wear-resistance increase becomes increasing spread in different branches of mechanical engineering. In view of high hardness of the work surface of parts, finishing is carried out by flat grinding.

During the hardened steel grinding there are formed burns, cracks, admixtures of abrasive particles in the work surface which are inadmissible defects in a surface layer of critical parts mounted in the fuel unit of an aviation engine.

The analysis of literature and company experience has shown that after thermal treatment instead of finishing is necessary to use surface finishing by a face milling method, but there are no sufficient recommendations for tool choice and cutting modes to date. Jointly with the educational department there are carried out theoretical researches of cutters for the face milling of the "selector housing" mass-produced parts consisting of corrosion-resistant 95H18-Sh steel with the hardness of 59÷61 HRC. In the paper there is considered a chemical composition of 95H18-Sh steel, a method for manufacturing a cast, its physical, mechanical and chemical properties.

Taking into account data obtained for the face-milling cutter installation on the frame there was chosen Sandvik Coromant material for the replaceable cutting insert the base of which consists of hard alloy 1010 with PVD coating.

Later on there was carried out selection of basic geometrical parameters and characteristics of a cutting plate and also a micro-geometry of a major cutting edge and a tip. Mass-produced replaceable through-away plates with R245-12 T3 M-PM number of 1010 hard alloy and PVD coating were obtained from the catalog of Sandvik Coromant company. At the end of the work a conclusion was drawn that the application of face milling will allow ensuring the requirements to the design documentation of the product, decreasing thermal and power stress of the process, increasing productivity, surface quality and excluding the necessity in abrasion, and the investigation results are applicable to the fulfillment of the complete factor experiment and computation of a simulator with the definition of the impact of variable factors upon a response function.

Key words: steel, face milling, alloy, coating, micro-geometry, cutting edge, tip (vertex).

Введение

Применение деталей из закалённых сталей с целью повышения коррозионной износостойкости находит всё большее распространение в различных отраслях ма-

шиностроения. Сегодня на авиационном машиностроительном предприятии АО «ОДК-СТАР» (г. Пермь), наряду с материалами на основе алюминия изготавливают-

ся детали из закалённой стали, которые устанавливаются на агрегаты дозирования топлива комплексной электронно-гидромеханической системы автоматического управления. Совместно с кафедрой «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета проведены теоретические исследования режущего инструмента для торцевого фрезерования серийно изготавливаемой детали «Корпус селектора», входящей в состав топливного агрегата. Материал детали состоит из коррозионно-стойкой стали марки 95X18-Ш [1], у которой после серии технологических операций по термической обработке твёрдость при проведении неразрушающего контроля по методу Роквелла повышается до 59-61 HRC. Габаритные размеры детали составляют 41×35×18 мм (Д×Ш×В), при окончательной механической обработке её поверхности с размером 41×35 мм и припуском 0,25 мм, необходимо обеспечить технические требования: шероховатость $Ra \leq 0,63$ мкм, отклонение от плоскостности $\Delta \leq 0,01$ мм, а также выдержать допуск размера $18_{-0,02}$ мм.

Для обеспечения указанных требований на детали выполняются окончательные механические операции, одна из которых – плоское шлифование на универсальном станке. После обработки шлифованием технические требования детали соответствуют конструкторской документации, но при этом на обработанной поверхности возникают дефекты, свидетельствующие

Химический состав и свойства стали 95X18-Ш

Массовая доля химических элементов: железо (Fe) $\leq 82,1\%$, углерод (C) 0,9-1,0%, хром (Cr) 17-19%, кремний (Si) $\leq 0,8\%$, марганец (Mn) $\leq 0,8\%$, никель (Ni) $\leq 0,6\%$, медь (Cu) $\leq 0,3$, фосфор (P) $\leq 0,03\%$, сера (S) $\leq 0,025\%$.

По химическому составу, при содержании углерода (C) 0,9-1,0%, сталь является высокоуглеродистой, а при сумме легирующих элементов в сплаве от 18 до 23 % данная сталь относится к высоколегированной. Сталь содержит легирующие эле-

об изменении физико-механических свойств, а также снижении выносливости, например: микротрещины, прижоги и цвета побежалости.

В дальнейшем проведён анализ научных работ отечественных и зарубежных авторов, относящихся к тематике исследований в области эффективной лезвийной обработки материалов из закалённых сталей высокой твёрдости. На основе полученной информации установлена причина дефектов, главная из которых – повышенная температура в зоне контакта шлифовального круга с деталью. Установлено, что для устранения указанных дефектов и обеспечения качества обработанной поверхности, возможно заменить механическую операцию шлифование на менее затратную и производительную, такую как торцевое фрезерование.

С целью проведения теоретических и экспериментальных исследований торцевого фрезерования выбран вертикально-фрезерный станок повышенной точности с числовым программным управлением *Emcomill E600* (Австрия) и режущий инструмент – корпус торцевой фрезы шведской фирмы «*Sandvik Coromant*» *CoroMill R245-063Q22-12M* [2]. В посадочные гнезда данной фрезы устанавливаются сменные режущие пластины с механическим креплением винтом М3,5×0,6. Для выбора режущих пластин, способных обеспечить технические требования изготавливаемой детали, предварительно необходимо подробно изучить технические характеристики обрабатываемого материала.

менты и примеси, которые влияют на диаграмму состояния стали, аллотропические превращения и формирование новых фаз. Комбинированное влияние легирующих элементов и термической обработки даёт различную микроструктуру и свойства стали. Также имеет влияние на свойства и структуру стали отдельно взятый легирующий элемент, поэтому необходимо учитывать взаимодействие всех легирующих элементов, а также в отдельности. Легирующими элементами в сплаве являются

Cr и *Ni*. Постоянными примесями являются *Si*, *Mn* и *Cu*, а случайными примесями – *P* и *S*.

Способ производства отливки, указанный в конце марки стали буквой «Ш», означает, что её изготовление выполнено по технологии электрошлакового переплава металла, а полученная сталь является особо высококачественной. Электрошлаковый переплав является видом металлургического процесса, при котором металл переплавляется в ванне электропроводного шлака, нагреваемого электрическим током. При таком способе переплава значительно повышается качество металлов и сплавов, так как при изменении состава шлака и температурного режима процесса, осуществляется рафинирование металла. После выполнения электрошлакового переплава снижается содержание серы в 2-5 раз, а кислорода и неметаллических включений в 1,5-2,5 раза. Слиток характеризуется плотной направленной макроструктурой, свободен от дефектов литейного и

Материал и покрытие режущих пластин

Исходя из полученных данных о свойствах обрабатываемого материала и рекомендаций производителя режущего инструмента, наиболее рациональным материалом режущих пластин для прерывистой фрезерной обработки закалённой стали являются твёрдые сплавы с покрытием. К основным преимуществам твёрдых сплавов относятся устойчивость к пластической деформации, термическому удару и высокая износостойкость.

Одним из видов режущих пластин подходящих для комплектации с корпусом торцевой фрезы «Sandvik Coromant» являются сменные неперетачиваемые режущие пластины, состоящие из твёрдого сплава 1010.

Основы сплава 1010 (*HC*) является мелкозернистой. Массовая доля химических элементов в сплаве: карбид вольфрама (*WC*) 92,5 % с содержанием углерода (*C*) 5,8%; кобальт (*Co*) 4,5 %; карбид тантала (*TaC*) с карбидом ниобия (*NbC*) 3 %; пластификатор парафин 2 %. Физические свойства: размер сечения зерна карбида

усадочного происхождения. Химическая и структурная однородность слитка обуславливает изотропность физических и механических свойств металла.

После комплекса операций по термической обработке, материал образцов приобретает окончательные свойства. Физические свойства: флокеночувствительность (склонность стали к поражению трещинами) – не чувствительна; плотность $\rho = 7,75$ г/см³. Механические свойства: предел прочности при растяжении $\sigma_{B.} = 1980-2300$ МПа; твёрдость по методу Роквелла 59÷61 HRC; ударная вязкость $KCU = 63$ Дж/см²; предел выносливости $\sigma_{-1} = 960$ МПа; при выполненном отпуске с установленной рабочей температурой 160 °С, не склонна к отпускной хрупкости; коэффициент теплопроводности $\lambda = 24$ Вт/(м·°С); удельная теплоёмкость при 100 °С = 482 Дж/(кг·°С). Химические свойства: сталь имеет коррозионную, кислотную стойкость при температуре до 500 °С.

0,5-0,8 мкм – субмикронный; плотность 15,05 г/см³; теплопроводность 68,5 Вт/(м·°С). Механические свойства: способность сопротивления растяжению или сжатию при упругой деформации 650 ГПа (Модуль Юнга); предел прочности при изгибе 2600 Н/мм²; твёрдость 1800 HV (по Виккерсу). Сплав применяется для обработки чугуна и закалённых сталей при непрерывном и прерывистом полустовом точении и фрезеровании.

Основы сплава 1010 имеет многослойное покрытие *TiAlN* (алюмонитрид титана), полученное методом *PVD* (физическое осаждение из паровой фазы в вакууме).

Массовая доля химических элементов в покрытии *TiAlN*: титан (*Ti*) 54 %, азот (*N*) 26 %, алюминий (*Al*) 20 %. Физические свойства: чёрно-фиолетового цвета; общая толщина покрытия 6 мкм; уровень внутренних напряжений 2 ГПа/мкм; максимальная рабочая температура (стойкость к окислению) до 800 °С; коэффициент трения при сухом резании 0,4. Механические

свойства: твёрдость 3400 *HV* (по Виккерсу). Покрытие применяется при резании материалов с низкой теплопроводностью, таких, как нержавеющие стали, титановые и никелевые сплавы. Используется для покрытия инструментов из быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов. Небольшая толщина покрытия, полученного методом *PVD*, позволяет повысить остроту режущей кромки, что приводит к снижению трения и вибрации. Небольшой коэффициент трения позволяет снизить образование наростов и улучшает отделение стружки. Стойкость покрытия увеличивается при высоких режимах резания. Рекомендуется использовать со смазочно-охлаждающим технологическим средством (СОТС) в газообразном агрегатном состоянии, применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) недопустимо.

Для сравнения с зарубежным производителем рассмотрен российский аналог основы сплава 1010, которым является твёрдый сплав ВК6-ОМ. Массовая доля химических элементов в сплаве: карбид вольфрама (*WC*) 92 % с содержанием в своём составе углерода (*C*) 5,7 %; кобальт (*Co*) 6%; карбид тантала (*TaC*) 2%. Физические свойства: размер сечения зерна карбида 0,5÷1,5 мкм – субмикронный; плотность 15 г/см³; теплопроводность 69 Вт/(м·°С). Механические свойства: способность сопротивления растяжению или сжатию при упругой деформации 632 ГПа (Модуль Юнга); предел прочности при изгибе 1300 Н/мм²; твёрдость 90,5 *HRA* (по Роквеллу). Сплав применяется для чистой и получистой обработки твёрдых, легированных и отбеленных чугунов, закаленных и нержавеющих сталей, высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена (точение, растачивание, развертывание, нарезание резьбы, шпоровка, тонкое фрезерование).

Одним из эффективно применяемых отечественных способов нанесения покрытия, конкурирующих с покрытием *PVD*, является вакуумно-дуговое нанесение покрытия методом КИБ (катодно-ионной бомбардировки). Метод КИБ обеспечивает

прочную адгезию с основанием защитного покрытия благодаря внедрению атомов титана в кристаллическую структуру нижнего слоя материала. Толщина покрытия составляет 3-5 мкм.

Отечественными предприятиями для закалённых сталей, налажен выпуск твёрдых особомелкозернистых сплавов ВК6-ОМ с покрытием. Для фрезерной обработки на предприятии АО «Кировградский Завод Твёрдых Сплавов» (Свердловская область) изготавливают сплавы AP10AM с многослойным *PVD*-покрытием *AlTiN* (нитрид алюмо-титана), AP10TT с *PVD*-покрытием *TiN-TiAlN* (нитрид титана – алюминитрид титана) и AP10XM с *PVD* покрытием *nACRo* (нитрид хром-алюминия с нанокompозитной структурой) [3]. Марки сплавов применяются для чистового и получистового фрезерования: чугуна, цветных металлов, титана, коррозионно-стойких, жаропрочных и закалённых сталей.

Согласно действующей государственной программе импортозамещения, применение инструмента российского производства является первоочередной задачей. Также, отечественный инструмент обладает преимуществом в цене, поэтому, для снижения себестоимости, в дальнейших исследованиях торцевого фрезерования закалённой стали предложено провести сравнительные испытания указанных отечественных режущих пластин в идентичных условиях.

Исходя из анализа данных о материале, необходимо осуществить выбор геометрических параметров режущей пластины для торцевого фрезерования закалённой высокоуглеродистой стали. Так как фрезерование является прерывистым, а твёрдость материала высокой, то значение прочности является критически важным фактором, влияющим на стойкость режущей пластины. На данный момент времени у фирмы «*Sandvik Coromant*» не существует широкой номенклатуры различной геометрии пластин из твёрдого сплава 1010, поэтому выбор параметров рассмотрен с учётом существующей серийно изготавливаемой номенклатуры.

Выбор основных геометрических параметров режущей пластины

Известно, что большой радиус при вершине (r_ε) позволяет увеличить подачу, глубину обработки, повышает прочность режущей кромки, но вместе с тем увеличивает вибрацию и радиальные силы резания. Поэтому значение r_ε увеличено до 1,5 мм.

Радиус при вершине также используется для расчёта теоретической средней высоты микронеровностей – шероховатости поверхности Ra , которая определяется по уравнению [4]:

$$Ra_{cp} = \frac{S_z^2}{8r_\varepsilon} 1000 \text{ (мкм)}, \quad (1)$$

где S_z – подача на зуб (мм/зуб).

Так как требуемое значение шероховатости обработанной поверхности $Ra = 0,63$ мкм, то необходимо определить оптимальное теоретическое значение подачи на зуб фрезы ($S_{z(теор.)}$) путём перестановки множителей в уравнении:

$$S_{z(теор.)} = \sqrt{\frac{Ra_{cp} \cdot 8r_\varepsilon}{1000}} \text{ (мм/зуб)}. \quad (2)$$

Тогда подставив числовые значения в уравнение получено:

$$S_{z(теор.)} = \sqrt{\frac{0,63 \cdot 8 \cdot 1,5}{1000}} = 0,087 \text{ (мм/зуб)}.$$

Для проверки соответствия полученного значения подачи характеристикам, предлагаемым производителем пластин, выполнено сравнение в виде двойного неравенства:

$$0,1 \text{ мм/зуб} < S_{z(теор.)} = 0,087 \text{ мм/зуб} < 0,28 \text{ мм/зуб}.$$

Из неравенства выявлено, что $S_{z(теор.)}$ находится в допуске значений производителя, следовательно, обеспечит выполнение требований предъявляемых к шероховатости обработанной поверхности.

Для увеличения прочности режущей кромки и снижения шероховатости обработанной поверхности применяется зачистная фаска (a). Недостатком наличия фаски является увеличение сил резания и повышение вибрации, поэтому принято значение $a = 2,05$ мм.

Так как глубина резания (t) $\leq 0,25$ мм, что существенно меньше $r_\varepsilon = 1,5$ мм, то

главная режущая кромка не участвует в работе и находится выше обрабатываемой поверхности, а вся нагрузка ложится на r_ε . В данном случае, при $t < r_\varepsilon$ снижаются вибрация, потребляемая мощность, а значит и шероховатость обработанной поверхности. Поэтому для пластины выбрана стандартная длина главной режущей кромки $L = 10$ мм.

С целью увеличения жёсткости и теплостойкости режущей пластины необходимо выбрать её толщину (h). Так как при возрастании толщины повышается её цена, следовательно, возрастает себестоимость механической обработки, принят размер $h = 3,97$ мм.

Для повышения прочности режущей кромки, ширины срезаемого слоя и распределения равномерной нагрузки увеличивают угол при вершине (ε). Но если значение

$\varepsilon > 90^\circ$, то увеличивается: вибрация, температура в зоне резания и потребляемая мощность. Поэтому для пластины принято значение ε равно 90° .

С целью снижения ударной нагрузки при входе радиуса режущей кромки в материал, главный угол в плане (φ) принят 45° , так как при значении $t > r_\varepsilon$ обеспечивается баланс осевой и радиальной сил резания на подшипниках шпинделя. При этом снижается толщина стружки за счёт увеличения её длины вдоль радиуса при вершине, что уменьшает сопротивление деформации обрабатываемого материала. Отрицательным явлением считается увеличение температуры в зоне резания из-за увеличения площади одновременно обрабатываемой поверхности.

Так как угол $\varepsilon = 90^\circ$, тогда вспомогательный угол в плане (φ_1) рассчитывается из уравнения:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varepsilon - \varphi. \\ \varphi_1 &= 90^\circ - 45^\circ = 45^\circ. \end{aligned} \quad (3)$$

При значении $\varphi_1 = 45^\circ$ отвод тепла и стружки из зоны резания происходит наиболее рационально. При дальнейшем увеличении φ_1 снижается прочность режущей кромки.

Выбор микрогеометрии главной режущей кромки

Для повышения прочности и термической стойкости режущей кромки применяется отрицательный главный передний угол (γ), но вместе с тем увеличивается площадь контакта между передней поверхностью пластины и стружкой, а значит и вибрация, нагрузка на режущую кромку, температура в зоне резания и износ инструмента. При положительном γ возрастает хрупкость режущей кромки, отсюда значение γ принято 15° .

Для снижения сил резания и трения главной задней поверхности о поверхность резания, необходимо уменьшать главный задний угол (α). Увеличение угла α приводит к снижению прочности режущего лезвия. Поэтому значение α принято 20° .

На прочность режущей кромки также влияет угол заострения (β), при уменьшении угла прочность снижается, в связи с этим значение β принято равным 55° .

С повышением угла резания (δ) увеличивается прочность режущей кромки, но

повышается температура в зоне резания и потребляемая мощность, поэтому δ принят 75° .

С целью повышения прочности и термической стойкости на режущей кромке выполняется упрочняющая фаска (b_y). При её наличии также повышается потребляемая мощность, поэтому значение b_y принято $0,2$ мм.

Для снижения сил резания, выделяемого тепла, износа инструмента и потребляемой мощности угол упрочняющей фаски (γ_y) выполняется положительным, а при отрицательном значении γ_y повышается прочность режущей кромки. Поэтому выбрано значение $\gamma_y = 0^\circ$.

На повышение стойкости режущей кромки влияет радиус округления упрочняющей фаски (r_y), но при его увеличении повышается сила резания и потребляемая мощность. Поэтому значение r_y принято $0,05$ мм.

Выбор микрогеометрии вершины главной режущей кромки

Чтобы снизить трение главной задней поверхности о плоскость резания, необходимо увеличить задний угол вершины (α_B), но при этом уменьшается прочность режущей кромки. Поэтому значение α_B принято 29° .

Для повышения прочности и термической стойкости режущей кромки, на вершине выполняется упрочняющая фаска ($b_{y.B.}$), но вместе с этим увеличиваются потребляемая мощность и температура в зоне резания. Поэтому значение $b_{y.B.}$ выбрано $0,25$ мм.

С целью снижения силы резания, температуры и износа режущей кромки, угол упрочняющей фаски вершины ($\gamma_{y.B.}$) должен стремиться к 0° . Так как обработка является прерывистой, то для повышения прочности значение $\gamma_{y.B.}$ принято -23° .

Для повышения стойкости вершины режущей кромки на ней необходимо выполнять радиус округления упрочняющей фаски вершины ($r_{y.B.}$), для данной обработки значение $r_{y.B.}$ принято $0,05$ мм.

Подведя итоги по выбору марки сплава, покрытия и геометрических параметров режущей пластины, для торцевого фрезерования закалённой высокоуглеродистой стали, выбраны и приобретены из серийного каталога компании «Sandvik Coromant» сменные неперетачиваемые режущие пластины с шифром *R245-12 T3 M-PM* из твёрдого сплава 1010 и покрытием *PVD*. На рис. 1 изображены геометрические параметры режущей пластины.

Основные характеристики режущей пластины: исполнение *R* – правое, количество режущих кромок 4, пластина односторонняя; скорость резания $V = 75-110$ м/мин, подача на зуб $S_z = 0,1-0,28$ мм/зуб; максимальная глубина резания $t_{max} = 6,5$ мм, масса 7 г, тип пластины с отверстием, *M* – наибольшая надёжность режущей кромки, *P* – область применения по *ISO*, *M* – для полустойкой обработки.

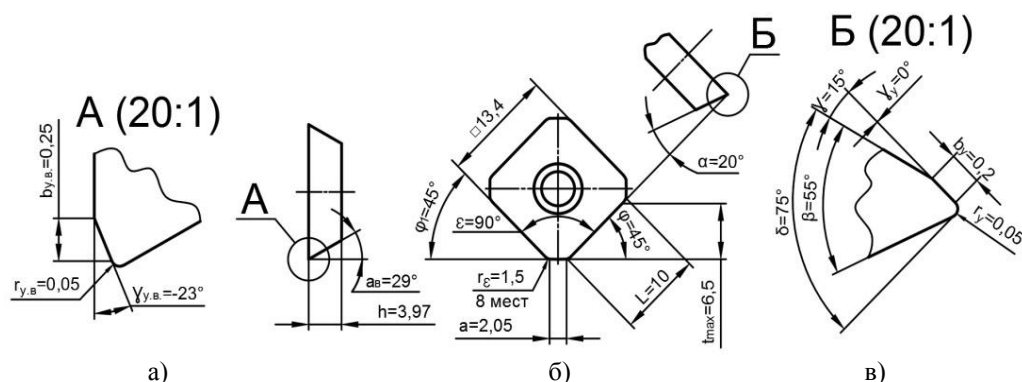


Рис. 1. Режущая пластина «Sandvik Coromant» R245-12 T3 M-PM сплав 1010:

а – микрогеометрия вершины главной режущей кромки;

б – основные геометрические параметры (M2:1);

в – микрогеометрия главной режущей кромки

Произведён внешний осмотр пластины (рис. 2, а) и выполнено визуальное контрольное измерение нескольких геометрических параметров режущей кромки пластины на стереоскопическом панкратическом цифровом микроскопе «ЛОМО» МСП-1 с USB, увеличением 40 крат. В результате измерения ширина зачистной фаски $a = 2,05$ мм (рис. 2, б), ширина упрочняющей фаски вершины главной режущей кромки $b_{y.v.} = 0,25$ мм (рис. 2, в).

Проверив размеры, можно сделать вывод, что размеры геометрических параметров выбранной пластины соответствуют заявленным производителем данным. В дальнейшем выполнена установка и закрепление режущей пластины на корпус применяемой торцевой фрезы (рис. 2, г) при помощи винта и специального ключа «Sandvik Coromant» 5680-049-01 TORX PLUS 15IP/3,5 с моментом затяжки 3,0 Нм.

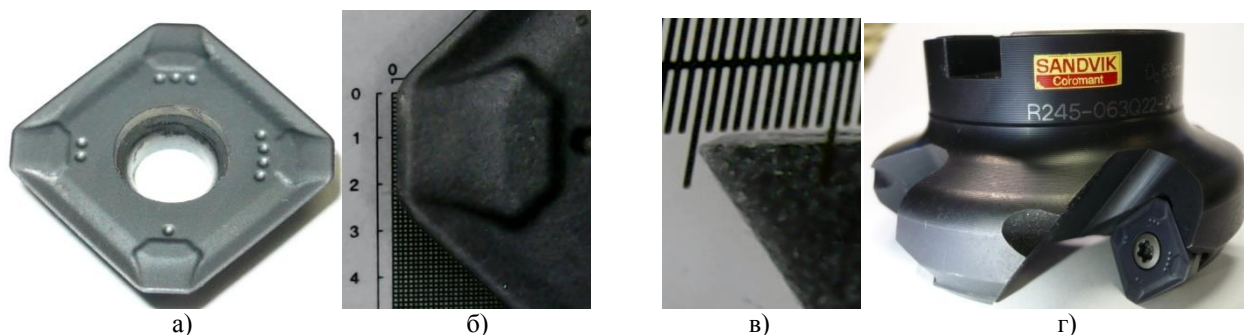


Рис. 2. Внешний вид режущего инструмента:

а – сменная режущая пластина «Sandvik Coromant» R245-12 T3 M-PM сплав 1010;

б – контроль зачистной фаски режущей пластины;

в – контроль упрочняющей фаски вершины главной режущей кромки;

г – торцевая фреза «Sandvik Coromant» CoroMill R245-063Q22-12M с установленной режущей пластиной

С помощью выбранных режущих пластин проведен натурный полный факторный эксперимент торцевого фрезерования закалённой стали 95X18-Ш режущим инструментом из твёрдого сплава, методом математического планирования с применением различных режимов резания: скорость резания V (м/мин), подача на зуб S_z

(мм/зуб) и глубина резания t (мм). Полученные результаты позволили выполнить статистическую обработку при помощи регрессионного и корреляционного анализа. В итоге анализа найдена адекватная математическая модель шероховатости обработанной поверхности:

$$Ra = 0,206118 - 0,000742 \cdot V + 4,19757 \cdot S_z + 0,068752 \cdot t - 0,04167 \cdot V \cdot S_z - 5,55282 \cdot S_z^2. \quad (4)$$

Сделана оценка тесноты связи переменных при одно- и двухфакторном влиянии на параметр оптимизации. На основе полученной математической модели, построены гиперповерхности функции в

зависимости от переменных факторов (рис. 3), которые определили оптимальные режимы резания для обеспечения качества поверхности и снижения себестоимости механической обработки.

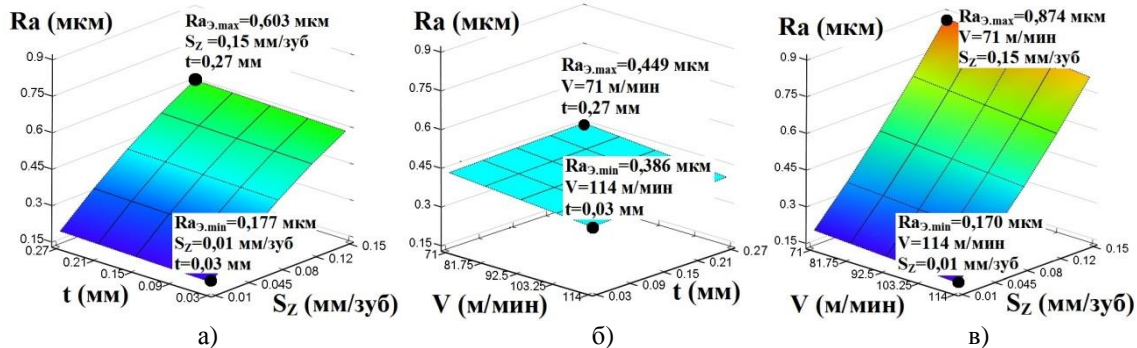


Рис. 3. Гиперповерхности и экстремумы функции шероховатости Ra (мкм) при переменных:
а – $V = 92,5$ м/мин; б – $S_z = 0,08$ мм/зуб; в – $t = 0,15$ мм

По гиперповерхности (рис. 3, а), выявлено изменение шероховатости обработанной поверхности по траектории коноида, где значение Ra изменяется линейно по оси t и экспонентой по оси S_z . Наиболее значимой переменной взаимодействия является S_z , при её снижении значение Ra уменьшается.

По гиперповерхности (рис. 3, б), выявлено изменение Ra по линейной траек-

тории по осям V и t . Наиболее значимая переменная взаимодействия V , при её повышении Ra уменьшается.

По гиперповерхности (рис. 3, в) выявлено изменение Ra по траектории коноида, где значение Ra изменяется линейно по оси V и экспонентой по оси S_z . Наиболее значимая переменная взаимодействия S_z , при её снижении и повышении V , значение Ra уменьшается.

Заключение

Изложенный порядок выбора режущей пластины и её характеристик для торцевого фрезерования закалённой высокоуглеродистой стали показывает, что применение новых методов обработки с точным подбором инструментальных материалов, геометрических параметров и научно-обоснованных режимов резания являются главными факторами в повышении периода стойкости режущего инструмента.

Так как фрезерование закалённой стали является чистовой обработкой, для обеспечения необходимого качества обработанной поверхности детали, согласно предварительным расчётам, подача на зуб фрезы имеет значения, не превышающие 50 % своих максимальных значений, рекомендованных производителем инструмента. Превышение теоретических показате-

лей подачи, в связи с циклической ударной нагрузкой на режущую кромку и высокой твёрдостью обрабатываемого слоя, как показал эксперимент, приводит к быстрому образованию микротрещин на кромке режущей пластины с последующим выкрашиванием, разрушением и потерей работоспособности пластины.

Применение торцевого фрезерования обеспечивает соответствие детали требованиям конструкторской документации, повышает производительность обработки, снижает тепловую и силовую напряженность процесса и исключает необходимость последующей абразивной обработки, такой как плоское шлифование, а результаты исследований могут быть применены на различных машиностроительных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марочник сталей и сплавов** / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.] ; под общ. ред. А. С. Зубченко. – Изд. 2-е. – Москва : Машиностроение, 2003. – 784 с. – ISBN 5-217-03177-8.
2. **Вращающиеся инструменты. Фрезерование.** Sandvik Coromant : каталог. – Москва : ООО «Сандвик», 2017. – 515 с.
3. **Металлорежущий инструмент 2019** : каталог. – Кировград : АО «КЗТС», 2019. – 284 с.
4. **Руководство Sandvik Coromant 2010 по металлообработке.** – Москва : ООО «Сандвик», 2010. – 800 с.
5. **Косовский, В. Л.** Справочник фрезеровщика / В. Л. Косовский. – Москва : Высшая школа [и др.], 2001. – 400 с. – ISBN 5-06-003952-8 (Высшая школа). – ISBN 5-7695-0206-1 (Изд. центр «Академия»)
6. **Табаков, В. П.** Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями : монография / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 152 с. – ISBN 5-89146-670-0.
7. **Баженов, М. Ф.** Твёрдые сплавы : справочник / М. Ф. Баженов, С. Г. Байчман, Д. Г. Карпачев. – Москва : Metallurgy, 1978. – 184 с.
8. **Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент** : справочник / В. С. Самойлов, Э. Ф. Эйхманс, В. А. Фальковский [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1988. – 368 с. – ISBN 5-217-00263-8.
9. **Чапорова, И. Н.** Структура спеченных твердых сплавов / И. Н. Чапорова, К. С. Чернявский. – Москва : Metallurgy, 1975. – 247 с.
10. **Родин, П. Р.** Основы проектирования режущих инструментов : учебник / П. Р. Родин. – Киев : Выща школа, 1990. – 424 с. – ISBN 5-11-001908-8.
11. **Хлудов, С. Я.** Теория проектирования сменных многогранных пластин с рациональной геометрией для чистового точения с дроблением стружки : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / Хлудов Сергей Яковлевич ; Тульский гос. ун-т. – Тула, 2007. – 487 с. – Библиогр.: с. 436-462.
12. **Пряжникова, А. А.** Обоснование рациональных геометрических параметров твердосплавных сменных многогранных пластин для чистового точения : специальность 05.02.07 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Пряжникова Анастасия Анатольевна ; Тульский гос. ун-т. – Тула, 2015. – 203 с. – Библиогр.: с. 159-173.
13. **Макаров, В. Ф.** Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов : учеб. пособие для вузов / В. Ф. Макаров. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 396 с. – ISBN 978-5-398-00057-3.
14. **Крутько, А. А.** Повышение эффективности точения сталей в тяжелых условиях термомеханического нагружения режущего лезвия : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Крутько Андрей Александрович ; Омский гос. техн. ун-т. – Тюмень, 2009. – 170 с. – Библиогр.: с. 144-162.
15. **Григорьев, С. Н.** Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента : монография / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 380 с. – ISBN 978-5-94178-251-2.
16. **Лошак, М. Г.** Прочность и долговечность твердых сплавов. / М. Г. Лошак. – Киев : Наук. думка, 1984. – 325 с.
17. **Мартынов, А. Д.** Методы и средства контроля многогранных твердосплавных пластин : обзор / А. Д. Мартынов. – Москва : НИИмаш, 1979. – 37 с.
1. **Grade List of Steels and Alloys** / A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Yu.V. Kashirsky [et al.]; under the general editorship of A.S. Zubchenko. – 2-d Edition. – Moscow: Mechanical Engineering, 2003. – pp. 784. - ISBN 5-217-03177-8.
2. **Rotating Tools. Milling.** Sandvik Coromant: catalog. – Moscow: PC “Sandvik”, 2017. – pp. 515.
3. **Metal-cutting Tool 2019:** catalog. – Kirovgrad: J-SC “KZTS”, 2019. – pp. 284.
4. **Sandvik Coromant 2010 Catalog on Metal-working.** – Moscow: PC “Sandvik”, 2010. – pp. 800.
5. **Kosovsky, V.L.** Miller’s Reference Book / Kosovsky. – Moscow: Higher School [et al.], 2001. – pp. 400. - ISBN 5-06-003952-8 (Higher School). - ISBN 5-7695-0206-1 (“Academy” Publishing Center).
6. **Tabakov, V.P.** Working Capacity of Face Mill with Multi-Layer Wear-Resistant Coatings: monograph / V.P. Tabakov, M.Yu. Smirnov, A.V. Tsirkin. – Uliyanovsk: UISTU, 2005. – pp. 152. - ISBN 5-89146-670-0.
7. **Bazhenov, M.F.** Hard Alloys: reference book / M.F. Bazhenov, S.G. Baichman, D.G. Karpachev. – Moscow: Metallurgy, 1978. – pp. 184.
8. **Metal-Working Hard-Alloy Tools:** reference book / V.S. Samoilov, E.F. Eichmans, V.A. Falkovsky [et al.]. – Moscow: Mechanical Engineering, 1988. – pp. 368. - ISBN 5-217-00263-8.
9. **Chapорова, I.N.** Structure of Sintered Hard Alloys / I.N. Chapорова, K.S. Chernyavsky. – Moscow: Metallurgy, 1975. – pp. 247.

10. **Rodin, P.R.** Fundamentals of Cutter Design: textbook / P.R. Rodin. – Kiev: Higher School, 1990. – pp. 424. - ISBN 5-11-001908-8.
11. **Khludov, S.Ya.** Theory of Designing Replaceable Indexable Insert with Efficient Geometry for Finish Turning with Chip Fragmentation: specialty 05.03.01 “Technology and Equipment of Machining and Physical-Engineering Processing”: thesis for competition of academic degree of Dr. Sc. Tech. / Khludov Sergey Yakovlevich; Tula State University. – Tula, 2007. – pp. 487. – References: pp. 436-462.
12. **Pryazhnikova, A.A.** Substantiation of Efficient Geometrical Parameters of Hard-alloy Indexable Inserts for Finish Turning: specialty 05.02.07. “Technology and Equipment of Machining and Physical-Engineering Processing”: thesis for competition of academic degree of Can. Sc. Tech. / Pryazhnikova Anastasia Anatolievna; Tula State University. – Tula, 2015. – pp. 203. – References: pp. 159-173.
13. **Makarov, V.F.** Choice and Destination of Optimum Conditions for Hard-to-Machine Billet Broaching: textbook for colleges / V.F. Makarov. – Perm: Perm State Technical University Publishers, 2008. – pp. 396. - ISBN 978-5-398-00057-3.
14. **Krutko, A.A.** Increase of Steel Turning Effectiveness under Hard Conditions of Cutting Edge Thermal-mechanical Loading: specialty 05.03.01 “Technology and Equipment of Machining and Physical-Engineering Processing”: thesis for competition of academic degree of Can. Sc. Tech. / Krutko Andrey Alexandrovich; Omsk State technical University. – Tyumen, 2009. – pp. 170. – References: pp. 144-162.
15. **Grigoriev, S.N.** Technological Methods for Wear-resistance Increase of Cutter Contact Areas: monograph / S.N. Grigoriev, V.P. Tabakov, M.A. Volosova. – Stary Oskol: TNT, 2011. – pp. 380. - ISBN 978-5-94178-251-2.
16. **Loshak, M.G.** Strength and Life of Hard Alloys. / M.G. Loshak. – Kiev: Scientific Thought, 1984, - pp. 325.
17. **Martynov, A.D.** Methods and Means for Indexable Hard-alloy Inserts: review / A.D. Martynov. – Moscow: RIMach, 1979. – pp. 37.

Ссылка цитирования:

Сединин, И.Н. Выбор марки сплава, покрытия и геометрических параметров режущей пластины для торцевого фрезерования высокоуглеродистой закалённой стали 95X18-Ш / И.Н. Сединин, В.Ф. Макаров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 4. – С. 18 - 27. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-4-18-27.

Статья поступила в редакцию 30.12.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета,

Хандожко А.В.,

гл. редактор журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 25.03.21.

Сведения об авторах:

Сединин Игорь Николаевич, аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета, инженер-технолог АО «ОДК-СТАР», e-mail: sedininigor@rambler.ru.

Sedinin Igor Nikolaevich, Post-graduate student of the Dep. “Innovation Technologies of Mechanical Engineering”, Perm National Research Polytechnic University, Processing engineer, JSC “ODK-STAR”, e-mail: sedininigor@rambler.ru.

Макаров Владимир Федорович, д.т.н., профессор, зам. заведующего кафедрой «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: makarovv@pstu.ru.

Makarov Vladimir Fyodorovich, Dr. Sc. Tech., Prof., Deputy-Head of the Dep. “Innovation Technologies of Mechanical Engineering”, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: makarovv@pstu.ru.