

УДК 621.9.025

Ю. П. Ракунов, канд. техн. наук, доцент, **В. В. Абрамов**, д-р техн. наук, профессор**А. Ю. Ракунов**, инженер.

НИУ Московский государственный строительный университет, Россия

Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: Rakunov1991@mail.ru

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ УНИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА И РЕЗЦОВ С НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫМИ СМЕННЫМИ ПЛАСТИНАМИ ПРИ РЕЗАНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье проведен сравнительный анализ работоспособности и рентабельности использования унифицированного инструмента и резцов с неперетачиваемыми СМП при механической обработке труднообрабатываемых материалов (ТОМ) деталей машин и изделий на токарном оборудовании с ЧПУ. Показана обобщенная механо-физическая модель изнашивания и деформации режущих пластин с покрытиями. Разобраны методические подходы фирм-производителей СМП к вопросам выбора геометрических параметров назначению режимов резания при обработке ТОМ и определению стойкости инструмента по сравнению с отечественным подходом. Приведены экспериментальные данные исследований резцов с СМП и унифицированного инструмента. Доказано, что резцы с СМП имеют повышенный и даже недопустимый для чистового точения износ в период приработки из-за неоптимальной геометрии режущего клина при обработке ТОМ. На основании анализа сделан вывод о том, что кардинально импортозамещение может быть осуществлено только при использовании отечественных разработок по комплексному использованию гаммы унифицированного инструмента, режимов оптимального резания, методик многоуровневой базовой технологии и групповой обработки, основанной на специально спроектированных типажах унифицированного инструмента.

Ключевые слова: труднообрабатываемые материалы, физическая модель изнашивания, сменные многогранные пластины, работоспособность, рентабельность, интенсивность износа, стойкость, путь резания, режимы оптимального резания, импортозамещение.

Y. P. Rakunov, V. V. Abramov, A.Y. Rakunov

WORKING CAPACITY AND EFFICIENCY OF THE UNIFIED TOOL AND CUTTERS WITH NON-TRANSFERABLE INTERCHANGEABLE INSERTS WHEN CUTTING HARD-WORKED MATERIALS

The article provides a comparative analysis of the performance and profitability of using a unified tool and cutters with non-reworked inserts for machining difficult-to-machine materials (DTM) of machine parts and products on CNC turning equipment. A generalized mechano-physical model of wear and deformation of coated cutting inserts is shown. The methodological approaches of the manufacturers of IPIs to the selection of geometric parameters, the appointment of cutting modes when processing DTM and the determination of tool life in comparison with the domestic approach are analyzed. Experimental data of investigations of incisors with an insert and a unified tool are presented. It has been proven that cutters with an insert tool have increased and even unacceptable wear for finishing turning during the running-in period due to the suboptimal geometry of the cutting wedge during DTM processing. Based on the analysis, it was concluded that import substitution can be radically implemented only when using domestic developments in the integrated use of a range of unified tools, optimal cutting modes, multilevel basic technology and group processing techniques based on specially designed types of unified tools.

Keywords: hard-to-machine materials, physical model of wear, interchangeable polyhedral inserts, performance, profitability, wear rate, durability, cutting path, optimal cutting modes, import substitution.

1. Введение

В современном машиностроении, двигателестроении и на предприятиях ОПК все большее применение находят изделия из сложнолегированных конструкционных сталей и сплавов, обычно называемых **труднообрабатываемыми материалами (ТОМ)**.

© Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.; 2021

ТОМ значительно различаются по свойствам и назначению (высокопрочные и сверхпрочные, коррозионно-стойкие, жаропрочные, жаростойкие тугоплавкие, магнитные и немагнитные и др.), строению (аустенитные, металлокерамические, сотовые) и основному элементу, входящему в его состав (никелевые, кобальтовые, титановые, алюминиевые, вольфрамовые и др.) [1-3]. Например: 36НХТЮ, 12Х18Н10Т, 45Г17ЮЗ.

В качестве основных элементов в составе жаропрочных сплавов используют магний и алюминий (рабочая температура до 400...500°C), бериллий и титан (до 500...600°C), железо, никель, кобальт (до 800...1100°C), хром, молибден, ниобий, вольфрам, титан (до 2000°C). Наиболее широко используют жаропрочные коррозионно-стойкие сплавы на основе железа, никеля, кобальта и титана: ХН35ВТЮ, ХН32Т, ХН60ВТ, Inconel 718, 600, 601, 604, 625 [3].

К материалам с высокими удельными прочностью и жесткостью относятся высокопрочные и сверхпрочные стали, титановые сплавы и неметаллические материалы, например угле-, боро- и стеклопластики. Титановые сплавы при тех же прочностных показателях, что и обычные легированные стали, имеют в 1,63 раза меньшую плотность, вместе с тем обладают очень низкой теплопроводностью, а также высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах [1-5]. К ТОМ относятся магнитно-твердые и магнитно-мягкие материалы, обладающие высокими электрофизическими свойствами (магнитная проницаемость, магнитная энергия, радиопрозрачность и др.).

Высокой жаропрочностью характеризуются сплавы на основе никеля и кобальта, которые не теряют своих свойств при нагревании до 800...850°C. Жаропрочность этих сплавов связана с упрочняющим действием искаженной кристаллической решетки, образующейся при использовании тугоплавких элементов внедрения (вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и др.) [3-5], например, ХН77ТЮР, ХН72МВКЮ, ХН60МВТЮ, ХН82ТЮВМ, ВЖ36-Л2, ЖС6К.

По данным В. Н. Подураева, обработка резанием ТОМ составляет 90...95% среди других производительных формообразующих операций (анодно-абразивная, электрохимическая, электроэрозионная обработка). Но резание ТОМ - чрезвычайно сложный и энергоёмкий процесс, что связано с особенностями физико-механических и теплофизических свойств таких уникальных конструкционных материалов [3-5].

Рассмотрим основные особенности резания ТОМ. Высокие значения твердости и прочности, которые сохраняются при нагревании до высоких температур, создают в зоне резания повышенные контактные напряжения и увеличивают вероятность выхода из строя РИ вследствие его хрупкого или пластического (вязкого) разрушения. [1-5].

Низкая теплопроводность ТОМ в сочетании с высокой прочностью приводят при резании к росту мощности основных источников теплоты и ее перераспределению главным образом за счет увеличения интенсивности теплового потока в сторону РИ, особенно с непереитачиваемыми СМП, что увеличивает вероятность потери формоустойчивости режущего клина (РК) т/с инструмента и его последующего пластического разрушения [2-4].

Высокая химическая активность большинства ТОМ, особенно при температурах, возникающих при резании, приводит к активизации механо-физико-химических процессов на контактных площадках РИ (границная адгезия, твердофазные и жидкофазные диффузионные реакции между инструментальным и ТОМ) и является главной причиной интенсификации таких видов изнашивания РИ, как адгезионно-усталостный и диффузионный [1-5].

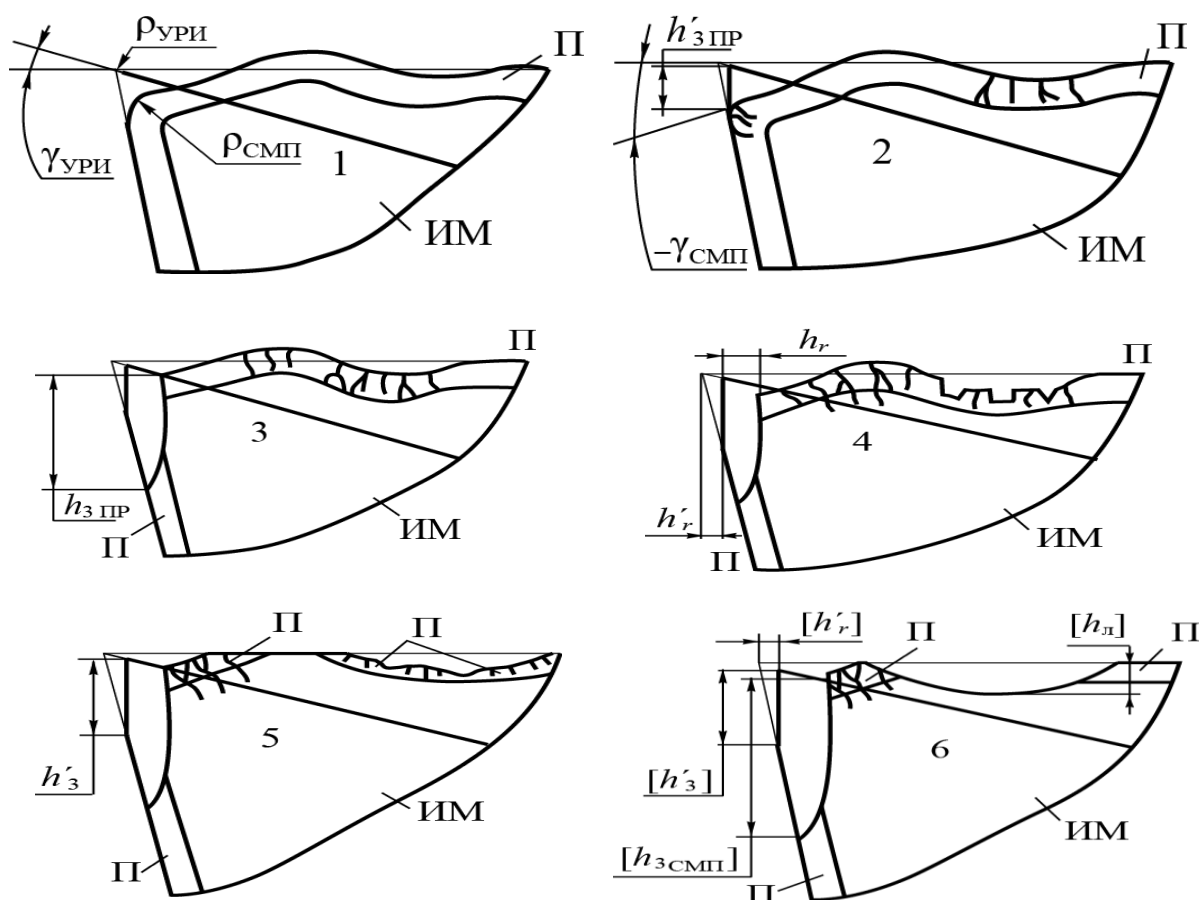


Рисунок 1. Обобщенная механо-физическая модель изнашивания и деформации т/с РИ с покрытием: П – покрытие; ИМ – инструментальный материал: 1 – пластическая деформация РК, вызванная действием эквивалентных напряжений на передней поверхности (ПП) СМП; 2 – зарождение и развитие трещин на контакте по задней поверхности (ЗП) и участке упругого контакта (УУК) по ПП; 3 – разрушение покрытия на контакте по ЗП, дальнейшее развитие трещин на УУК и образование трещин на участке пластического контакта (УПК) в результате деформации режущей части РИ; 4 – развитие очага износа по ПП, локальные разрушения покрытия на УПК с прорастанием их в основу т/с; 5 – дальнейшее разрушение покрытия на УУК, локальные вырывы макрообъемов покрытия и разрушение покрытия на УПК; 6 – образование лунки износа, интенсивное развитие очагов износа на контактных поверхностях, ведущее к катастрофическому износу РИ [6-9]. Для сравнения показана геометрия УРИ: $\gamma_{УРИ}$, $\rho_{УРИ}$ и характеристики износа $h'_{3_ПР}$, $[h'_3]$, $[h'_r]$ [14-16,21,23].

Склонность ТОМ некоторых групп к механическому упрочнению в процессе пластического деформирования при резании приводит к росту интенсивности абразивного изнашивания. При упрочнении металла возрастают его упругие свойства, что приводит к следующим эффектам: увеличиваются упругое последствие, длина контакта задней поверхности и поверхности резания, тепловыделение из-за трения, что, в свою очередь, приводит к росту интенсивности изнашивания контактных площадок РК, причём разрушение покрытия начинается с вершины СМП (рис. 1) [4,6 -19]

2. Основное содержание и результаты работы

Капиталистический принцип: «Извлечение прибыли любой ценой», вынуждает производителей создавать изделия ограниченного ресурса под тем или иным «благовидным» предлогом, или назначать условия эксплуатации, снижающие ресурс (преднамеренно или по незнанию - недоизученности предмета: инструмента и режимов оптимального резания - РОР) [6-11]. Так, например, под предлогом «увеличения прочности» режущей сменной многогранной пластины (СМП) предлагается тупая геометрия режущего клина (РК) – с отрицательным передним углом γ , что ещё в большей степени нагружает РИ: увеличиваются все усилия резания P_x , P_y и P_z – нагружаются все механизмы станка, повышается потребная мощность резания, теряется точность обработки из-за упругих деформаций системы ЗИПС, нагартовывается (наклёпывается) обработанная поверхность [6-9]. Под предлогом использования увеличенной подачи (производительности) РИ радиус округления режущих кромок ρ *изготавливается* и поддерживается в диапазоне 25-35 мкм, что приводит, особенно, при подачах чистового и получистового резания точением (0,1...0,25 мм/об) к увеличению износа по задней грани $h_{зпр}$ за период приработки $t_{пр} = 1,5...3$ мин до величины $h_{зпр} = 0,22...0,25$ мм, что составляет не менее половины допустимого износа РК пластины СМП (от 1/2 до 5/8 [h_3]).

При этом время приработки составляет от 1/10 до 1/5 времени (периода) так называемой «нормативной» стойкости РИ с СМП, которая за последние 40 лет была снижена в 4 раза (с 60 до 15 минут), а для ТОМ – до 4...6 мин. Под предлогом «увеличения производительности» (о качестве при этом не упоминают) были выработаны рекомендации о повышении скорости резания, превышающей не только оптимальную V_0 , экономическую $V_э$, но и скорость максимальной производительности $V_{МП}$ (см. рис. 2). Это «мероприятие» просто «убивает» РИ, но при этом резко увеличивает потребное количество СМП для производства изделий – инструментоёмкость и станкоёмкость производства, что также способствует извлечению сверхприбыли из потребителя РИ с СМП и обогащает не только производителя, но и посредников, поставляющих «расходный» материал – СМП на предприятия - потребители, т.е. производителям полезных «обществу потребления» изделий широкого спроса [15-25].

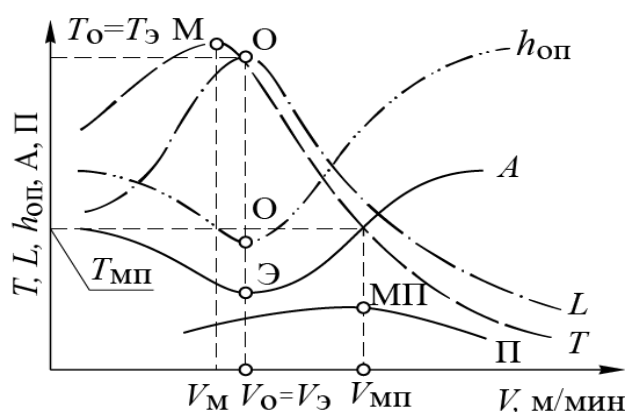


Рисунок 2. Схема влияния скорости резания на период стойкости T , путь резания L , интенсивность относительного размерного износа РИ $h_{оп}$, технологические себестоимость A и P -- производительность обработки ТОМ (по Макарову А. Д.).

Такие выводы подтверждаются экспериментальным исследованиям резцов с СМП формы CNMG120408-3J и УРИ при обтачивании цилиндрических поверхностей $\varnothing 43 \times 504$ мм и $\varnothing 80,5 \times 414$ мм из стали 08X18H10T.

Резцы PCLNMG 2020 K12, оснащенные СМП формы CNMG120408-3J (рис. 3) из твердого сплава марки NL40 (фирмы STEELRAM, Швейцария) [7,8]. Точение проведено с подачей $S = 0,15$ мм/об и глубиной резания $t = 0,1$ мм. Одна вершина ромбической СМП была использована при обтачивании заготовки с начальным диаметром

Ø80,5 мм при частоте вращения $n = 630 \text{ мин}^{-1}$. После 13-ти проходов резцом путь резания составил $L=8938 \text{ м}$, время обработки $\tau = 56,9 \text{ мин}$ при средней скорости резания $V_{\text{ср}} = 157 \text{ м/мин}$. При этом износ по задней поверхности $h_3 = 0,56 \text{ мм}$. Вторая вершина этой же СМП обрабатывала заготовку с начальным Ø43 мм при $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$. После 12-ти проходов со средней скоростью $V_{\text{ср}} = 164 \text{ м/мин}$ был пройден путь $L=5286 \text{ м}$, износ составил $h_3 = 0,56 \text{ мм}$, время обработки $\tau = 33,1 \text{ мин}$. Таким образом, при разности диаметров обрабатываемых заготовок в 1,87 раза наблюдается отличие в стойкости СМП в 1,72 раза, в пути резания – в 1,69 раза. При этом большая стойкость соответствует обрабатыванию заготовок большего диаметра (см. рис.3).

Для повышения достоверности полученных результатов стойкостные испытания были продублированы при обрабатывании заготовок из той же стали, но с использованием СМП формы CNMG120404-HF из т/с марки NC320 (Korloy) [7,8]. При обрабатывании заготовок Ø41 мм при $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$, $V_{\text{ср}} = 154 \text{ м/мин}$. После 18-ти проходов путь резания $L=7437 \text{ м}$ и $h_3 = 0,33 \text{ мм}$ за время работы $\tau = 49,2 \text{ мин}$ (см. рис. 4). При обрабатывании 2-ой вершиной той же СМП исходный диаметр заготовки Ø70 мм. Было сделано 15 проходов при $n = 800 \text{ мин}^{-1}$ ($V_{\text{ср}} = 172 \text{ м/мин}$). Путь резания $L=8922 \text{ м}$ и $h_3 = 0,33 \text{ мм}$ за время работы $\tau = 51,9 \text{ мин}$. Если оценивать износостойкость РИ по времени их работы при равном износе, то может сложиться мнение, что в этих двух опытах она практически одинакова (см. кривые 2 и 3 на рис. 4). Однако, если сравнить стойкость по пути резания, что более объективно, то она \approx в 1, 2 раза больше для заготовки Ø70 мм, что свидетельствует о большей износостойкости РИ в этих условиях (на участке нормального характера износа).

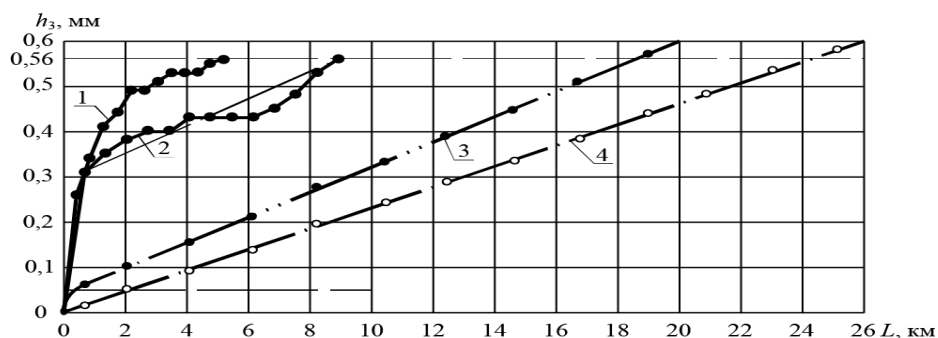


Рисунок 3. Влияние длины пути резания L на износ h_3 при обрабатывании стали 08X18H10T резцами: 1, 2 - PCLNMG 2020 K12, оснащенные СМП формы CNMG120408-3J: 1 – заготовка Ø43 мм; 2 - Ø80,5 мм; 3, 4 - заготовка Ø50 мм – обработка резцами унифицированными наружными (РУН): (державка ВхН: 20x20 мм) с многократно перетачиваемыми составными (МПС) РЭ Ø7 мм; режимы резания: $V_0 = 167 \text{ м/мин}$, $S_0 = 0,21 \text{ мм/об}$ и $t = 1 \text{ мм}$.

Резцы с СМП имеют повышенный (недопустимый для чистового точения) износ в период приработки из-за **неоптимальной геометрии РК**: повышенный $\rho = 25 \dots 35 \text{ мкм}$ и отрицательный передний угол γ . В начальный период приработки РК интенсивно изнашивается по задней грани (по радиусу ρ), **размерная стойкость неприемлема** – приходится постоянно, после каждого прохода по обработанной поверхности вводить коррекцию на размер. После окончания приработки за время $t_{\text{пр}} = 1,5 \dots 3 \text{ мин}$ износ по задней грани достигает величины $h_{3\text{пр}} = 0,22 \dots 0,25 \text{ мм}$, и только после этого РК приобретает приемлемые (но не оптимальные) характеристики – процесс стабилизируется и выходит на «нормальный характер» износа. Однако, с учётом периода приработки $t_{\text{пр}}$,

его интенсивность $h_{оп}$ составляет значительную и не постоянную величину 0,38...0,69 мкм/дм².

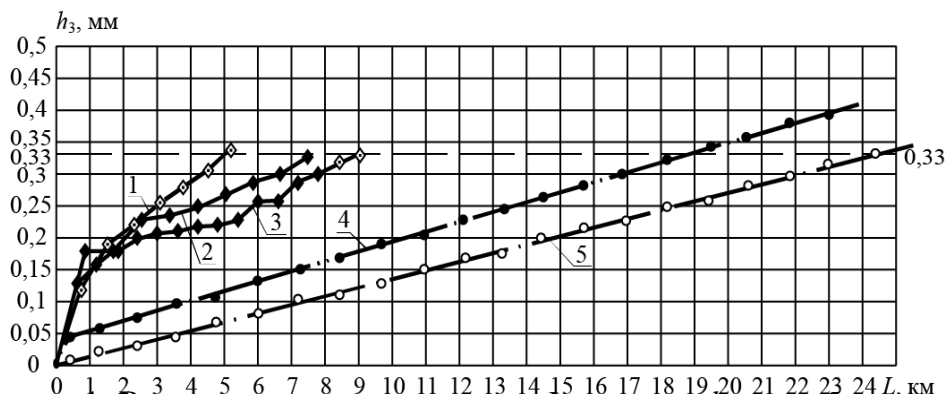


Рисунок 4. Влияние длины пути резания L на износ h_3 при обтачивании стали 08X18H10T резами: 1, 2, 3 - СМП формы CNMG120404-HF: 1 – заготовка Ø35 мм, 2 - Ø45 мм, 3 – Ø70 мм; 4, 5 - заготовка Ø50мм – обтачивание РУН: (державка ВxН: 16x16мм) с МПС РЭ Ø5 мм; режимы резания: $V_0 = 160...175$ м/мин, $S_0 = 0,15$ мм/об и $t = 0,1$ мм.

Этот определяющий показатель $h_{оп}$ выше, чем для унифицированного РИ (УРИ), который составляет $h_{опо} = 0,21$ мкм/дм² при более высоких режимах: $V_0 = 167$ м/мин, $S_0 = 0,21$ мм/об и $t = 1$ мм. УРИ имеет период приработки $\tau_{пр} \leq 1,5$ мин и величину $h_{зпр} \leq 0,05$ мм (кривая 3 на рис. 3) при условии заточки и доводки РЭ УРИ алмазными кругами и практически отсутствует период приработки при заточке РЭ алмазными кругами и доводке их в многоместных приспособлениях алмазными пастами (см. кривую 4 на рис. 3) [7, 13-16]. При наружной обработке на тех же режимах оптимального резания (РОР), на которых работали резами с СМП ($S = 0,15$ мм/об и $t = 0,1$ мм) и УРИ с РЭ Ø5 мм из т/с Т15К6 показали следующие результаты (см. рис. 4): оптимальная V_0 для диаметра обработки Ø80 мм составила $V_{01} = 175$ м/мин, для диаметра Ø38 мм - $V_{02} = 160$ м/мин.

Геометрические параметры наружного резца унифицированной конструкции (см. рис. 5) следующие: $\phi = 95^\circ$, $\phi_1 = 15^\circ$, $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\rho = 6...8$ мкм – для РЭ, заточенных и доведённых алмазными кругами; $\rho = 3...5$ мкм – для РЭ, доведённых алмазными пастами после заточки алмазными кругами [13-15,21]. Величина износа по задней грани в период приработки $h_{зпр} \approx 0,035...0,05$ мм за время $\tau_{пр} = 1...1,5$ мин. Интенсивность относительного поверхностного износа для РЭ заточенных и доведённых алмазными кругами составила $h_{оп} = 0,192$ мкм/дм² на участке нормального износа (рис. 3, кривая 3); путь резания при износе $h_3 = 0,25$ мм равнялся $L_{0,25} = 13315$ м, а при дальнейшем продолжении опыта и достижении $h_3 = 0,33$ мм -- $L_{0,33} = 18917$ м, что превышает путь резания (стойкость) резцов с СМП от $18917/8922 = 2,12$ до $18917/7437 = 2,54$ раза.

Для РЭ, доведённых алмазными пастами после заточки алмазными кругами интенсивность износа практически постоянна и составляет $h_{опо} = 0,132$ мкм/дм². Путь резания при $h_3 = 0,33$ мм - $L_{0,33} = 24458$ м. Таким образом стойкость УРИ, т. е. путь резания L в этом случае превышает стойкость резцов с СМП от $24458/8922=2,74$ до $24458/7437=3,29$ раза (рис. 3, кривая 4). Обладая меньшей интенсивностью износа, УРИ обеспечивают более высокую (на один - два качества) точность обработки, наименьшую шероховатость поверхности, минимум глубины и степени наклёпа, а также наименьшие остаточные напряжения в поверхностном слое обрабатываемых рабочих

поверхностей ответственных деталей машин, приборов, агрегатов, летательных и космических аппаратов [15,19,21,24-26].

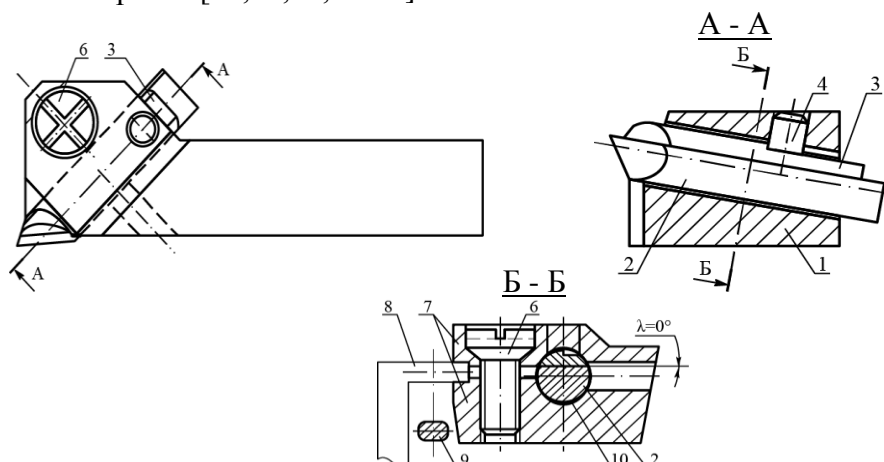


Рисунок 5. Резец унифицированный наружный контурный (РУНК) с элементами крепления многократно перетачиваемых составных РЭ Ø5 мм и Ø7 мм [14-16].

Преимущества УРИ по стойкости (точности) в сравнении с лучшими РИ с СМП, в частности, сплава **KCS10B** [18], наглядно иллюстрируется при обработке сплава **Inconel 718 (NiCr19Fe19NbMo DIN)**, широко используемого за рубежом (рис. 6).

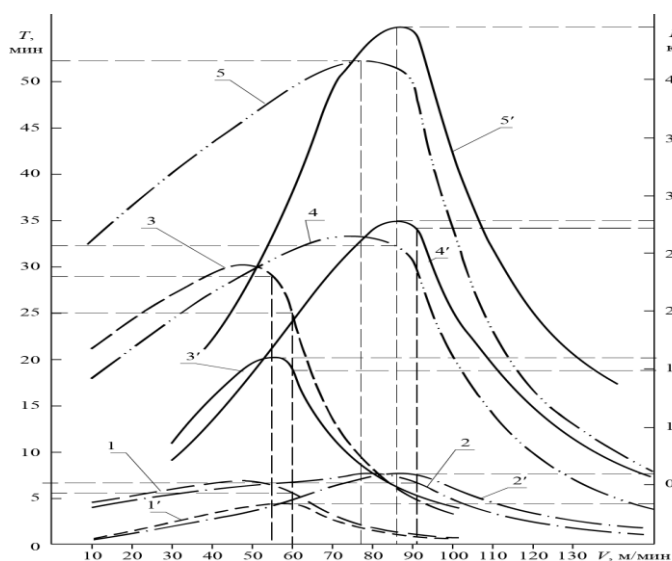


Рисунок 6. Стойкость (T , мин; L , км) РИ с механическим креплением: 1) СМП ромбической формы из т/с с покрытием методом высокоэнергетического импульсного магнетронного переноса (марки **KCS10B** – патент фирмы Kenametal) при непрерывном точении с СОЖ (1,1'; 2,2') сплава **Inconel 718 (NiCr19Fe19NbMo DIN)** [18], аналог РФ: ХН45МВТЮБР в сравнении с 2) РУНК (ВхН – 20x20, составной РЭ Ø7 мм из сплава ВРК15) – (3,4,5; 3',4',5'); 1,2,3,4,5 – $T=f(V)$; 1',2',3',4',5' – $L=f(V)$; 1,3,1',3': $S = 0,25$ мм/об, $t = 1,5$ мм; 2,4,2',4': $S = 0,15$ мм/об, $t = 0,25$ мм; 5,5': $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,15$ мм; для всех опытов допустимый износ $[h_3] = 0,31$ мм.

Работа любого РИ на $V < V_0$ приводит к снижению производительности обработки и повышению её себестоимости. Точность обработки и размерная стойкость РИ при этом также снижаются, а расход РИ, отнесённый к одной детали, повышается (рис. 2 - 4, 6 - 8). Использование $V > V_3$ неизбежно приводит к снижению размерной стойкости РИ, точности обработки и производительности общественного труда. Расход РИ и себестоимость обработки повышаются. Очевидно, что целесообразный диапазон изме-

нения V заключён между линиями V_0 и V_3 . Выбор V по линии V_0 должен производиться при высоких требованиях к точности при обработке крупных деталей в точном машиностроении, а также при эксплуатации РИ на многорезцовых станках при групповой обработке деталей и в условиях автоматизированного производства. В остальных случаях V должны выбираться по линии V_3 . Выбор скорости резания $V_{МП}$ приводит обычно к потере стойкости РИ при его повышенном износе и ведёт к увеличению инструментальности производства, даже единичного.

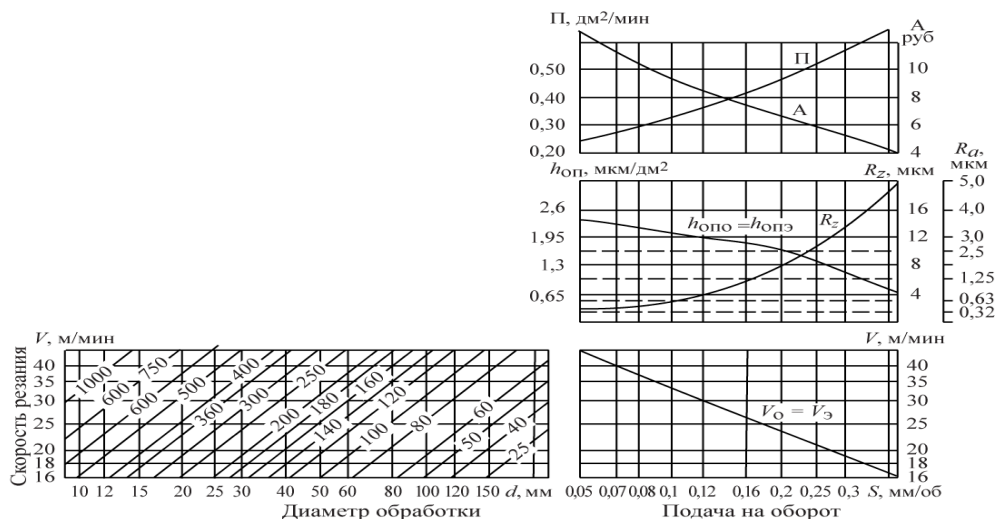


Рисунок 7. Номограмма определения РОР при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР или специального сплава 36НХТЮ. Резец РУНК с РЭ составным Ø5 мм из ВК60М: $\gamma = 12^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\varphi = 95^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $R = 0,3 - 0,5$ мм; $t = 0,25 - 1,0$ мм.

Наличие на некоторых номограммах сетки с числами оборотов n шпинделя станка и линий V_0 и V_3 , на узловых точках которых проставлена величина эффективной мощности резания (для $t=1$ мм), облегчает задачу наиболее полного использования мощности станка и позволяет оператору принимать правильные решения при округлении числа n в сторону меньшего или большего числа [26]. При обработке углеродистых и легированных сталей наивысшая точность обработки и минимальная её себестоимость наблюдаются при работе на различных скоростях резания (линии V_0 и V_3 на рис. 1 и 2 работы [26]). Характерной и важной для практики особенностью обрабатываемости жаропрочных сплавов и закалённых сталей (см. рис. 2, 6, 7 и 8) является полное совмещение линии V_0 с линией V_3 , и линии h_{ono} – с линией $h_{оп}$. При точной механической обработке ТОМ РОР, являющиеся оптимальными по размерной стойкости РИ, являются оптимальными и по себестоимости обработки и производительности общественного труда [1-5,14,15].

Исследования показали, что изменение глубины резания в пределах от 0,25 до 3 мм при обработке конструкционных углеродистых и легированных сталей (Сталь 45, 50, 20Х13, 40Х13, 30ХГСА, ШХ15) почти не отражается на величине h_{ono} УРИ. Но приведённые на рис. 7 и 8 номограммы могут быть использованы для выбора режимов резания (S и V) с глубинами резания, обычно применяемыми при чистовой и получистовой обработке. Разработка таких номограмм для ТОМ может производиться лишь для узкого диапазона изменения глубины резания (например, $t = 0,25 - 1,0$ мм для жаропрочных сплавов типа ХН77ТЮР или 36НХТЮ).

Такие номограммы и разработанные с их использованием таблицы-матрицы выбора инструментальных наладок и РОР для группового производства позволяют увязы-

вать выбор РОР с шероховатостью поверхности, точностью, производительностью и себестоимостью обработки; производить расчёты точности обработки на металлорежущих станках; снизить потери времени работы оборудования в автоматизированном групповом производстве, вызываемые износом УРИ; обоснованно назначать кинематические характеристики проектируемых станков и автоматических линий [1, 2, 14-16]. Априори назначаемые периоды стойкости РИ под предлогом того, так удобно технологом или нормировщикам, без определения оптимальных: скорости резания V_O и h_{ono} (или удельной поверхности определенного качества, приходящейся на 1 мкм размерного износа) для типоразмера (модели) РИ, является попыткой завуалировать степень незнания области применения модели РИ и типоразмера (модели) обрабатываемой поверхности и материала обработки в конкретном его состоянии: отожженном, нормализованном, улучшенном, закаленном, состаренном или дисперсионно отвержденном [6,7,10,11].

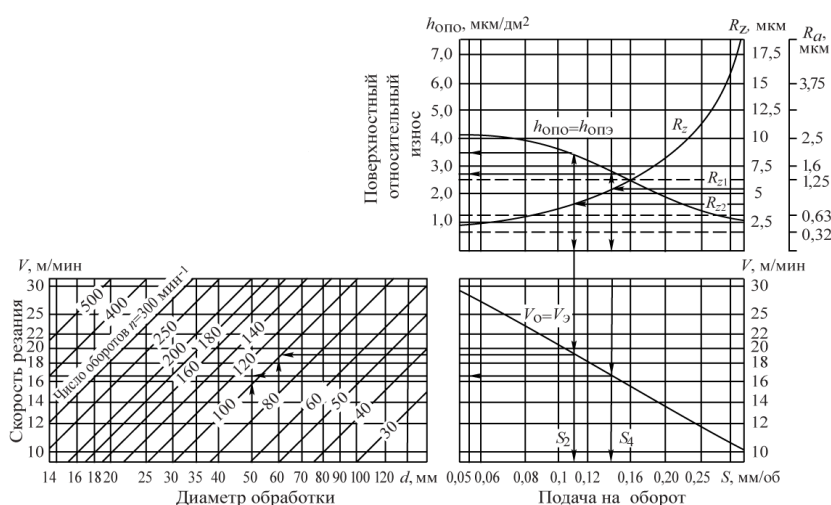


Рисунок 8. Номограмма определения S и V при точении закаленной стали ЭХ12М HRC 58-59. РУН с РЭ стержневым $\varnothing 7$ мм из Т15К6: $\gamma_{пр} = - 18^\circ$; $\gamma_{поп} = 0^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 15^\circ$; $R = 0,3$ мм; $t = 0,2 \dots 0,3$ мм.

Экономический или бухгалтерский (начетнический) подход к оптимизации (или так называемой «рационализации») условий резания не может заменить истинно научный подход, который учитывает механо-физико-химические основы контактного взаимодействия типоразмера РК (радиус округления режущей кромки ρ , задний угол α , передний угол γ , с равновесной шероховатостью передней и задней поверхности РК) РИ и материала заготовки в его конкретном механо-физическом состоянии, т.е. назначают и определяют РОР на основе закона существования оптимальной температуры резания θ_0 , которая соответствует V_O , обеспечивающей минимум h_{ono} данной модели РИ при обработке модели ТОМ (пары моделей материалов) [1-5,14,15].

Использование РОР предопределяют необходимость оптимизации радиуса округления ρ режущего клина, который обеспечивает минимизацию сечения среза, особенно, при тонкой (прецизионной), финишной (отделочной) и высокоскоростной обработке ТОМ и закаленных материалов [15,16,23].

3. Выводы и рекомендации.

Режущие инструменты различных типоразмеров иностранных фирм-изготовителей с СМП характеризуются повышенным (при финишной обработке – недопустимым) износом в начальный период приработки по нескольким причинам неоп-

тимальной геометрии РК для чистовой и получистовой обработки увеличенным (большим) радиусом $r = 25 - 35$ мкм: малым номинальным углом γ (обычно истинный угол γ – отрицательный);

– наличие нерегламентированного дефектного слоя на поверхности и подложке т/с, на который наносится износостойкое покрытие и которое несёт в себе дополнительные внутренние остаточные напряжения, а также напряжения на границе с поверхностью т/с, определяющие адгезию (схватывание) покрытия с подложкой. Эти напряжения, складываясь с рабочими напряжениями от усилий резания приводят к отслаиванию и разрушению покрытия, а за ним и основы твердого сплава. Считается, что покрытие исчезает в первые секунды или минуты резания ТОМ (см. рис. 1) [3, 4, 6, 8]. В период приработки $t_{пр}$ режущий клин (РК) резцов с неперетачиваемыми СМП интенсивно изнашивается по адгезионному механизму и подвергается абразивному износу (механическому истиранию) (см. рис. 1), при том, что обрабатываемая поверхность – выглаживается путем наклёпа. Кроме того, повышенная интенсивность износа при работе на средних и высоких V с малыми сечениями среза - ($S = 0,05 \dots 0,15$ мм/об) объясняется высокой чувствительностью многих марок т/с к изменению исходных механических свойств ТОМ в результате наклёпа (нагартовки). Так, при работе на подаче $S = 0,1$ мм/об (и/или при $t = 0,1$ мм) глубина наклёпа больше толщины срезаемого слоя α и РК всё время работает в наклёпанном слое, что и усугубляет повышенную интенсивность износа РИ [2,6-13]. При увеличении $\alpha > 5r$ ($S \geq 0,2$ мм/об и $t \geq 0,2$ мм) глубина наклёпа становится меньше толщины срезаемого слоя, что способствует снижению интенсивности износа РК резцов с СМП. В диапазоне $S = 0,1 \dots 0,2$ мм/об преобладающим оказывается действие следующих факторов:

- с повышением S (при $V = const$) пропорционально сокращается путь резания L , следовательно, уменьшается время резания и величина износа h_3 ;
- повышение S также **снижает поверхностный относительный износ** $h_{оп}$;
- при увеличении $S \approx t$ изменяется глубина наклёпанного слоя h_c и отношение h_c к толщине среза α $\Delta h_c = h_c/\alpha$, и, несмотря на повышение температуры резания Θ и повышение диффузионного износа, $h_{оп}$ – снижается.

При дальнейшем повышении S РК всё время работает под наклёпанным слоем и на $h_{оп}$ влияет температура Θ . Кривые $h_{оп} = f(S)$ приобретают экстремальный характер при работе как на средних, так и высоких V (температурах) резания (см. рис. 6, 7 и 8), соответствующих правой (ниспадающей) ветви кривой зависимости $h_{оп} = f(\Theta)$. Эффект выглаживания (термо-механического наклёпа) обрабатываемой поверхности, особенно ярко проявляющийся в период приработки СМП (до $h_3 = 0,2 \dots 0,3$ мм и за время $t_{пр} = 3 \dots 5$ мин), приводит к упрочнению поверхностного слоя заготовки, что затрудняет дальнейшую получистовую и чистовую (особенно финишную) обработку, снижая тем самым стойкость РИ с СМП с покрытиями и качество окончательно обработанной поверхности (рис. 3 и 4). При использовании импортных резцов с СМП (да и отечественных – тоже [16]) на предприятиях ВПК (в частности, двигателестроительный НПЦ газотурбостроения «Салют», заводах ОКБ «Сухого», заводе им. Хруничева) в технологии механической обработки ответственных деталей летательных и космических аппаратов (ЛиКА) появились записи **«режущую пластину сменить после одного прохода»** по обрабатываемой поверхности или **«принудительно сменить СМП после нескольких минут работы»**, т. е. технологам и всем производственникам приходится перестраховываться, применяя РИ с неперетачиваемыми СМП. **Такие решения усугубляют ситуацию, т. к. РИ с СМП работают в период приработки с высокой интенсивностью изнашивания.** Это положение возникает по причине отсутствия достоверной информации, которая должна предоставляться ведущими фирмами-производителями рез-

цов с СМП, о характере износа и стойкости этих пластин при обработке различных конструкционных, жаропрочных, особенно ТОМ. Такое недопустимое положение заставляет предприятия-потребители самим заниматься испытаниями тех СМП, которые во множестве распространены на рынке от различных производителей (вплоть до чешских, итальянских и китайских), не говоря уже о SANDVIK Coromant, ISCAR, KORLOY, MITSUBISHI, ISCAR, KENNAMETALL и многих других. Нежелание предоставлять результаты стойкостных испытаний СМП этих фирм легко объяснить – это им невыгодно! Машиностроители РФ в этом смысле свой рынок уже потеряли, или близки к такому состоянию. Т. о. РФ попадает в техническую и технологическую зависимость от стран Запада. *«Благосостояние нации висит на кончике резца»* - это высказывание классиков трудно переоценить [1-5,15-17,24,25]. *Технический отечественный прорыв* в следующий технологический уклад возможен только посредством широкого использования типажей качественного ресурсосберегающего инструмента XXI века - УРИ (патент РФ) в совокупности с первичной подсистемой многоуровневой базовой технологии (МБТ) машиностроения – отечественной разработкой, позволяющей осуществлять групповую технологию и поднять качество обработки, производительность и эффективность опытного, серийного многономенклатурного и массового производства [14-19, 21-26]. *Необходимо обгонять не догоняя, а создавать и использовать прорывные принципиально новые технологические решения!* Для сохранения независимости и отстаивания национальных интересов РФ необходимо развивать своё производство, не копирующее их «достижения», а реализующее отечественные разработки, в частности, унифицированный РИ и таблицы-матрицы РОР, разработанные в наукоёмкой первичной подсистеме многоуровневой базовой технологии, позволяющей эффективно реализовывать методы высокотехнологичной групповой технологии, повышая при этом стойкость УРИ в несколько раз (в 5 - 10 раз), гибкость производства, поднять его производительность и эффективность минимум в 2 раза [14-16,19,21,23,26]. При этом будут загружены отечественные инструментальные заводы, созданы рабочие места, повышена производительность труда при небольших капиталовложениях и внутренних инвестициях. Только так можно осуществить реальное *импортозамещение* и прорыв в новый технологический уклад XXI века по качеству и производительности нашей как оборонной, так и гражданской промышленности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
2. Макаров, А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.
3. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев – учеб. пособие для вузов. – «Высшая школа» 1974. – 587 с.
4. Андреев, В. Н. Инструмент для высокопроизводительного и экологически чистого резания. Серия «Библиотека инструментальщика»./ В. Н. Андреев, Г. В. Боровский, В. Г. Боровский, С. Н. Григорьев – М.: Машиностроение, 2010. – 480 с.
5. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я. Л. Гуревич [и др.] – 2-ое изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
6. Сорокин, Е. В. Повышение стойкости токарных резцов на основе учета формы передней поверхности и кривизны поверхности резания: дис ... канд. техн. наук / Е. В. Сорокин: ТГУ. – Тула, 2007. – 168 с.
7. Astakhov V. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. / V.P. Astakhov, P.J. Davim // Machining Fundamental and Recent Advances, Ed. Springer, pp 29-57, 2008.

8. Табаков, В. П. Функциональные параметры процесса резания инструментом с износостойкими покрытиями: учеб. пособие / В. П. Табаков, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 172 с.
9. Технический справочник SANDVIK Coromant: рук - во по металлообработке. – Москва, 2018.
10. Общий каталог металлорежущего инструмента ISCAR. Member IMC Group, – Москва, 2019.
11. Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. <http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp>. (дата обращения 12.2018).
12. Klocke F. Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. 500 p.
13. Металлорежущий инструмент. – АО «КЗТС» Каталог, 2017.
14. Пат. 2226453 РФ, Многократно перетачиваемый резец: / Ракунов Ю.П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А. – Бюл. № 10, 2004.
15. Ракунов, Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии /Ю. П. Ракунов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2012. – № 3. – С. 23-31.
16. Ракунов, Ю. П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин. Ю. П. Ракунов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 2. – С. 36-48.
17. Ермаков, Ю. М. Выбор оптимальной скорости резания на основе стойкостной зависимости для режущего инструмента. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 64 с.
18. Kennametal представляет токарный сплав KCS10B для обработки жаропрочных сплавов. Журнал «Твердый сплав». <http://tverdysplav.ru> (дата обращения 12.10.2020).
19. Справочник технолога / Под ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2019. – 678 с.
20. Справочник токаря-универсала / под ред. М. Г. Шеметова и В. Ф. Безъязычного, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 2007. – 576 с.
21. Ракунов, Ю.П. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ / Ю.П. Ракунов, В. В.Абрамов // Справочник. Инженерный журнал, приложение. – 2015. – № 7. – С. 1-29.
22. Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. 361 p.
23. Ракунов, Ю. П. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. // Журнал «Станкоинструмент». – 2020. – № 1, 2. – С. 66-79.
24. Копылов Ю. Р. Компьютерные технологии в машиностроении (практикум+CD): учебное пособие / Ю. Р. Копылов. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – 508 с.
25. Ермаков, Ю. М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
26. Ракунов, Ю. П. Номограммы выбора подач и скоростей резания исходя из требуемой шероховатости обработки и износа унифицированных резцов / Ракунов, Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. // Междунар. науч. журнал «Школа Науки». – № 11(22), Сентябрь, 2019. – С. 7-12.

Поступила в редколлегию 16.04.2021 г.