

УДК 621.914.1

## ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА НА ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4

© 2015 Д. В. Евдокимов, Д. Л. Скуратов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье показано влияние износа зубьев концевой фрезы по их задней поверхности на плотность тепловых потоков, возникающих в зоне резания. К ним относятся плотности тепловых потоков, возникающих в результате пластической деформации вследствие трения стружки о переднюю поверхность зуба фрезы и в результате трения задней поверхности об обрабатываемую заготовку. Получена зависимость температуры резания от величины износа инструмента. Выполнен расчёт теплового поля в инструменте. Представленные результаты численного эксперимента получены при помощи адаптированной методики, представляющей собой переработанную методику профессора А.Н. Резникова для условий концевой фрезеровки. В статье изложены основные этапы адаптации. Они основываются на геометрической специфике стружки. Непосредственное вычисление температурных полей в зоне резания при концевом фрезеровании выполнялось при помощи компьютерной, конечно-элементной модели. Данная модель учитывает гидродинамику смазывающе-охлаждающей жидкости, которая в большинстве случаев имеет место при фрезеровании и других процессах механической обработки.

*Плотность теплового потока, деформация, трение, концевая твёрдосплавная фреза, износ инструмента, температура в зоне резания.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-409-417

Современное производство характерно своей устойчивой тенденцией к усложнению промышленных изделий и использованию материалов, вызывающих сложности при механической обработке. В первую очередь это касается изделий авиационной техники. Данная тенденция во многих случаях приводит к необходимости изготовления высокоточных деталей со сложным фасонным профилем, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и высоких температур. Поэтому при изготовлении таких деталей значительное место уделяется состоянию поверхностного слоя [1-6], определяющего в значительной мере надёжность и долговечность детали и изделия в целом.

На формирование состояния поверхностного слоя деталей оказывают влияние силовой и температурный факторы [7]. Более того, если температура в зоне резания достигает значений, соответствующих значениям критических точек аллотропических превращений в поверхностном слое материала заготовки, то влия-

ние температуры на формирование поверхностного слоя существенно возрастает.

Значительное место в технологических процессах изготовления деталей отводится операциям фрезеровки. При этом нередко операции фрезеровки являются окончательными операциями, определяющими состояние поверхностного слоя деталей [1, 4, 6, 7].

В процессе фрезеровки, так же как при любом другом виде лезвийной обработки, имеет место затупление режущего инструмента, приводящее к росту сил и эффективной мощности резания, температуры в зоне резания и ухудшению качества обработки. Поэтому возникает задача по определению оптимального периода стойкости. При черновой и получистовой обработке, как правило, в качестве оптимального принимают экономический период стойкости, а при чистовой обработке – технологический период стойкости, который составляет половину от экономического периода стойкости, так как при чис-

товой обработке на первое место выступают требования к точности обработки, шероховатости поверхности и состоянию поверхностного слоя.

К основным факторам, влияющим на износ режущих кромок инструмента, относится температура в зоне резания [7-12]. Как известно, она оказывает доминирующее влияние на адгезионные и диффузионные процессы на контактных поверхностях инструмента, а эти процессы, в свою очередь, оказывают непосредственное влияние на скорость изнашивания и величину износа.

Теплофизика процесса резания подробно рассмотрена в работах А.Н. Резникова [11, 12]. В работе [11] на примере процесса точения он представил свою методику, позволяющую определять величины основных тепловых потоков, имеющих место в зоне резания. Схема распределения тепловых потоков (согласно А.Н. Резникову) представлена на рис. 1. Используя данную схему в своей методике, он выстроил алгоритм, позволяющий определять температуру в зоне резания [11], которая влияет не только на интенсивность износа инструмента, но и на структурно-фазовое состояние поверхностного слоя заготовки.

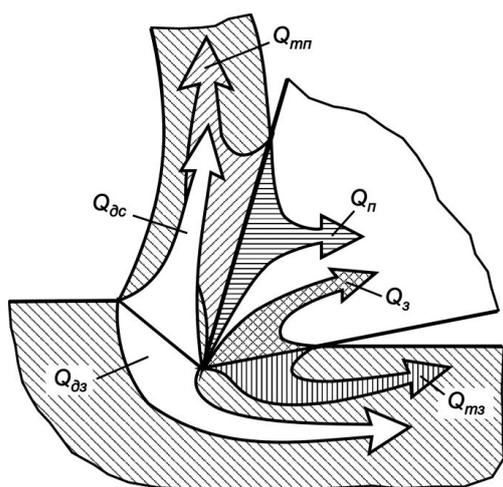


Рис. 1. Схема тепловых потоков через поверхности резца [11]

На рис. 1 обозначены:  $Q_{дс}$ ,  $Q_{дз}$  – тепловые потоки, поступающие соответственно в стружку и заготовку и вызванные пластической деформацией материала;

$Q_{мн}$  – тепловой поток, вызванный трением стружки о переднюю поверхность;  $Q_{мз}$  – тепловой поток, вызванный трением задней поверхности зуба фрезы об обработанную поверхность;  $Q_n$  – итоговый тепловой поток, возникающий между соприкасающимися телами на площадке контакта стружки с передней поверхностью зуба фрезы;  $Q_з$  – итоговый тепловой поток, возникающий на площадке контакта задней поверхности зуба фрезы с обработанной поверхностью.

Для определения температуры режущего инструмента представляют интерес плотности тепловых потоков, поступающих в него через переднюю ( $q_n$ ) и заднюю ( $q_з$ ) поверхности. Нахождение данных величин в методике сводится к совместному решению двух уравнений, составленных на основе уравнений теплового баланса.

Следует отметить, что в условиях стационарного резания, во-первых, должны быть равны между собой средние температуры на контактной поверхности изделия и задней поверхности резца и, во-вторых, должны быть равны между собой средние температуры на передней поверхности резца и на контактной поверхности стружки. Первое предположение исключает изменение температуры вдоль активного участка задней поверхности инструмента, второе – учитывает заторможенный слой.

## Методика

Методика для расчёта температуры в зоне резания, разработанная А.Н. Резниковым применительно к процессу точения, была адаптирована для расчёта температуры в условиях концевой фрезеровки [1]. Процесс адаптации содержит четыре пункта. Первые два пункта строятся исходя из того, что А.Н. Резников предлагал алгоритм вычисления плотностей тепловых потоков, используя два математических представления стружки, которые неприменимы для процесса концевой фрезеровки. А именно, особенно

стью для процесса точения является то, что стружка представлена в виде бесконечного стержня. Второй особенностью является то, что стружка имеет постоянное, не меняющееся по времени сечение. Третий пункт касается определения коэффициентов усадки стружки. На данном этапе очень помогли экспериментальные данные К.Ф. Митряева [8]. Четвёртый пункт адаптации касается определения длин контакта зуба фрезы с материалом

заготовки и стружкой. Специально для данного пункта была разработана компьютерная модель процесса концевой фрезерования в постановке явной динамики. Выполнена она внутри программы «ANSYS» в модуле «explicit dynamic». Проведя моделирование процесса резания, можно определить величины длин контакта. Этап моделирования представлен на рис. 2.

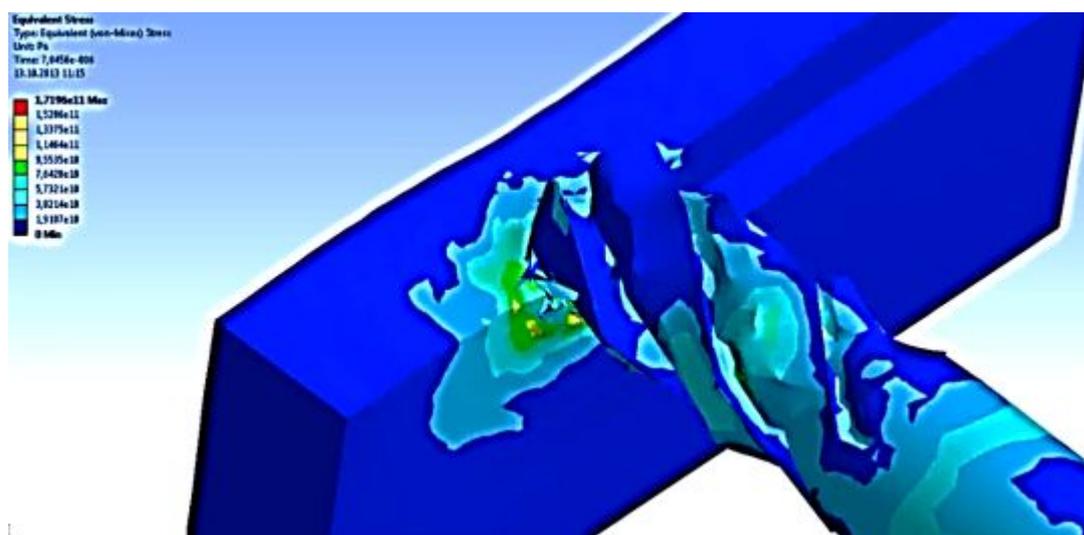


Рис. 2. К определению длин контакта режущего клина с заготовкой и стружкой

Знания тепловых потоков, идущих в переднюю и заднюю поверхности режущего инструмента, недостаточно для достоверного определения температурного поля в инструменте, в частности, в концевой фрезе. Достоверный расчёт температурного поля в инструменте возможен лишь при учёте его конвективного теплообмена с охлаждающей жидкостью и воздухом окружающей среды. Решение данной задачи может быть осуществлено на основе использования конечно-элементной модели, созданной в среде ANSYS и представленной в работе [1]. На базе этой модели был выполнен численный эксперимент для условий концевой фрезерования титанового сплава OT4 на режиме: скорость резания  $v = 30$  м/мин; подача на зуб  $S_z = 0,08$  мм/зуб; ширина фрезерования  $B = 3$  мм; глубина фрезерования  $t = 5$  мм.

Применительно к процессу концевой фрезерования титанового сплава OT4, согласно рекомендациям работы [13], за критерий затупления следует принять износ по задней поверхности ( $h_3$ ), равный 0,3...0,5 мм. Как показал опыт применения твёрдосплавных концевых фрез [14] с наноструктурированными износостойкими покрытиями и без них, при износе по задней поверхности зубьев свыше 0,3 мм наблюдается выкрашивание режущих кромок. Поэтому за допустимую величину износа принимался износ по задней поверхности, равный 0,3 мм.

### Основная часть

В процессе резания задняя поверхность каждого из зубьев фрезы изнашивается, что приводит, во-первых, к увеличению площади контакта между задней по-

верхностью режущего клина зуба и заготовкой и, во-вторых, к росту силы трения на задней поверхности зубьев инструмента. Затупление фрезы, как и любого режущего инструмента, сопровождается также увеличением составляющих силы резания. Например, по данным работы [13], при фрезеровании острыми фрезами главная составляющая сила резания в 2 раза, а радиальная в 4 раза ниже, чем при работе притуплёнными фрезами.

На основе использования расчётных зависимостей по определению плотности тепловых потоков на передней и задней поверхностях зубьев концевой фрезы были получены графики зависимости  $q_n$  и  $q_z$  от величины износа по задней поверхно-

сти, приведённые на рис. 3. Изменение  $q_n$  и  $q_z$  при увеличении износа по задней поверхности зуба фрезы от 0, 05 до 0,3 мм отражает картину плотности тепловых потоков при концевом фрезеровании для реальных (рабочих) условий резания, а изменение  $q_n$  и  $q_z$  при износе по задней поверхности – от 0,3 до 1,05 мм, т.е. от допустимой величины до катастрофических значений, приводящих к разрушению инструмента, даёт картину плотности тепловых потоков для возможных (критических) условий обработки. Вместе с тем, согласно данным работы [15], допустимая величина износа концевых фрез при обработке некоторых титановых сплавов может достигать 0,8 мм.

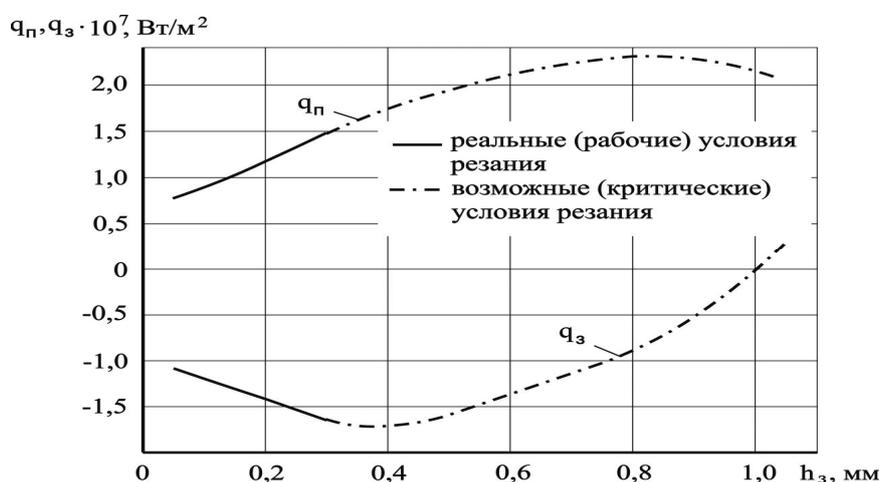


Рис. 3. Зависимость итоговой плотности тепловых потоков на передней ( $q_n$ ) и задней ( $q_z$ ) поверхностях каждого из зубьев концевой фрезы от износа на задней поверхности  $h_z$

Качественная картина изменения  $q_n$  и  $q_z$  при концевом фрезеровании (рис. 3) достаточно хорошо согласуется с картиной изменения  $q_n$  и  $q_z$  при точении, приведённой в [11] и показанной на рис. 4.

На рис. 3 по оси абсцисс отложена величина износа зуба фрезы по задней поверхности. На рис. 4 по оси абсцисс отложено время работы резца, рабочая часть которого представляет собой также режущее лезвие. Но, как известно, с увеличением времени работы резца возрастает и износ по задней поверхности. Поэтому в идеальном случае общие виды зависимостей  $q_n$  и  $q_z$  от времени работы и от величины износа должны быть аналогичны.

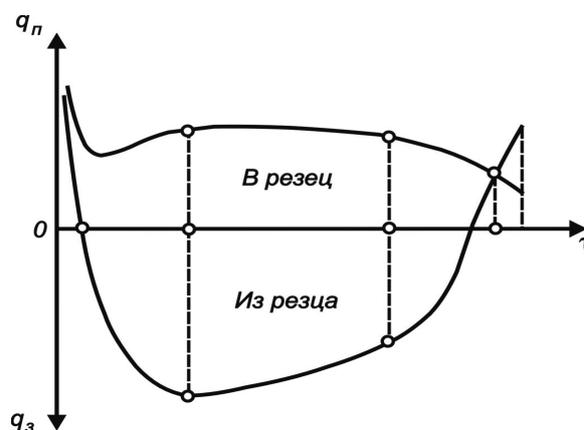


Рис. 4. Картина изменения плотности тепловых потоков на передней  $q_n$  и задней  $q_z$  поверхностях резца при точении [11]

Как видно из рис. 3, при  $h_z = 0,05$  мм, когда зубья фрезы полностью прогрелись и процесс резания стал установившимся, тепловой топик  $q_z$  движется в сторону изделия и его плотность постепенно возрастает по мере роста износа по задней поверхности. При достижении  $h_z = 0,35...0,4$  мм начинают интенсивно возрастать силы резания и температура из-за увеличения сил трения на задней поверхности зубьев, что приводит к возрастанию теплового потока, идущего в заднюю поверхность режущего клина. При этом общая плотность теплового потока, идущего в изделие, уменьшается при сохранении направления движения. Следует также отметить, что уменьшение абсолютного значения  $q_z$  происходит тем интенсивнее, чем больше износ по задней поверхности зубьев фрезы. Если величину износа по задней поверхности довести до значения, равного 1 мм, то итоговая плотность теплового

потока по задней поверхности будет равна нулю, а дальнейшее увеличение износа приведёт к изменению направления теплового потока.

Увеличение износа по задней поверхности зубьев фрезы приводит также к изменению  $q_n$ . С ростом  $h_z$  от 0,05 мм до 0,8...0,85 мм величина  $q_n$  интенсивно возрастает. По-видимому, это связано с тем, что с увеличением износа по задней поверхности интенсивно возрастает нормальная сила на площадке контакта инструмента с заготовкой, в результате чего увеличивается радиальная составляющая силы резания, а плотность теплового потока, связанная с пластической деформацией  $q_d$ , резко увеличивается с изменением направления движения, что видно из рис. 4. Характер изменения  $q_{mn}$  и  $q_{mz}$  с ростом износа по задней поверхности зубьев твёрдосплавной концевой фрезы приведён на рис. 4.

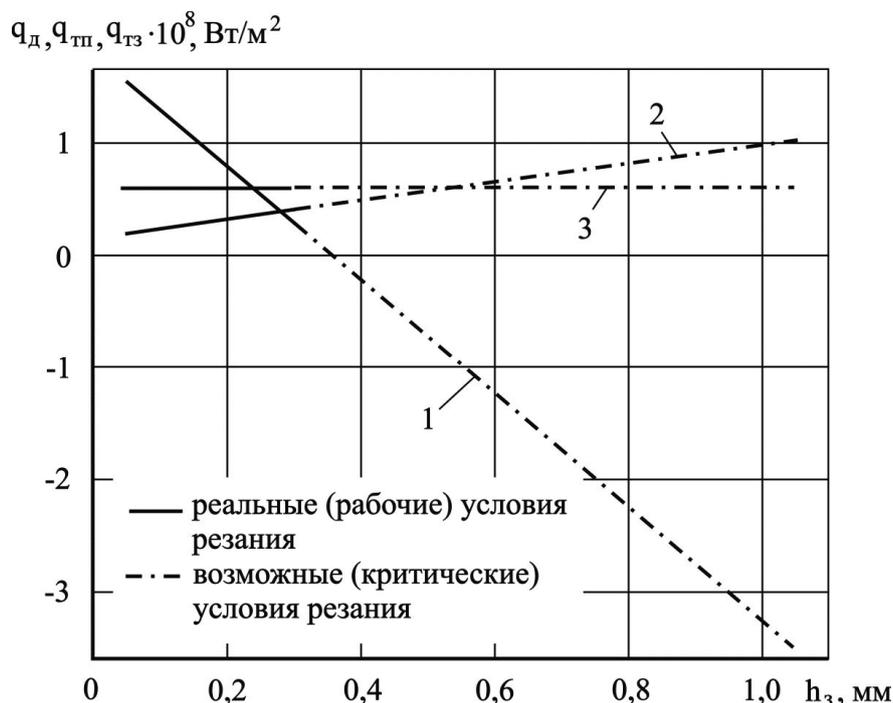


Рис. 4. Характер изменения тепловых потоков, обусловленных пластической деформацией  $q_d$  (1) и трением на передней  $q_{mn}$  (2) и задней  $q_{mz}$  (3) поверхностях инструмента от величины износа по задней поверхности зуба фрезы

Зная распределение плотности тепловых потоков, можно определить температурное поле в инструменте при различной величине износа зубьев фрезы по зад-

ней поверхности. На рис. 5 приведена зависимость изменения максимальной температуры в зоне резания от величины износа по задней поверхности зубьев фрезы.

Расчёт выполнен на основе использования модели, созданной в среде ANSYS.

На рис. 6 представлено температурное поле на передней поверхности зуба фрезы при различных значениях износа по задней поверхности. Как видно из рис. 6, наименьшее значение температуры

имеет место при  $h_3 = 0,3$  мм, т.к. в этом случае итоговый тепловой поток на задней поверхности зуба фрезы (рис. 3) движется из инструмента в сторону обрабатываемой заготовки.

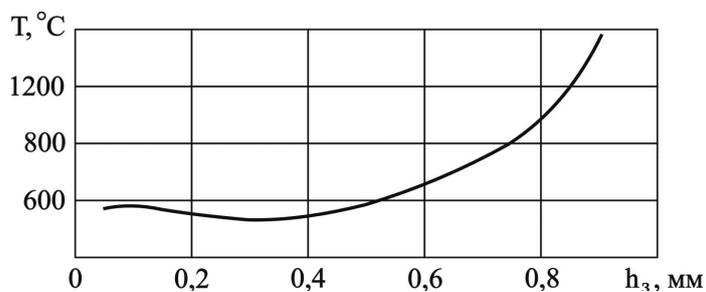


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры в зоне резания при обработке титанового сплава ОТ4

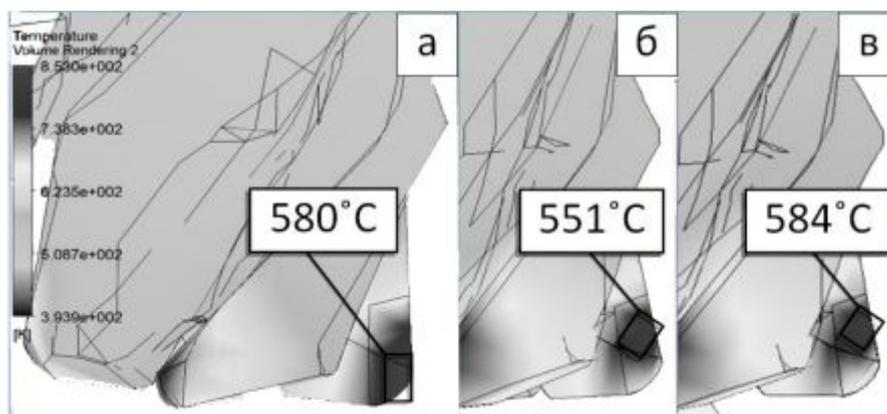


Рис. 6. Распределение температуры на передней поверхности инструмента в зависимости от величины износа по задней поверхности зуба фрезы: а – 0,05 мм; б – 0,3 мм; в – 0,5 мм

Сопоставление результатов численного эксперимента по определению температуры, представленных на рис. 5 и 6, с результатами расчёта температуры по эмпирической зависимости, полученной Б.А. Кравченко и К.Ф. Митряевым для условий фрезерования титанового сплава ОТ4 острыми фрезами [16], у которых  $h_3$  не более 0,05 мм, показало, что разница в температурах не превышает 5°C, т.е. погрешность не превышает 1%. Как видно из рис 6, а, температура на передней поверхности зуба фрезы, полученная на основе использования расчётной модели, равна 580°C, а температура, рассчитанная

по эмпирической зависимости, равна 575°C.

Таким образом, разработанная методика расчёта температуры резания при концевом фрезеровании позволяет рассчитывать температуру в зоне обработки с учётом износа инструмента по задней поверхности зубьев фрезы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г. (шифр темы 2013-218-04-4777) и Министерства образования и науки РФ.

### Библиографический список

1. Evdokimov D.V., Fedorov D.G., Skuratov D.L. Thermal Stress Research of Processing and Formation of Residual Stress When End Milling of a Workpiece // *World Applied Sciences Journal*. 2014. V. 31, Iss. 1. P. 51-55. doi: 10.5829/idosi.wasj.2014.31.01.14283
2. Skuratov D.L., Evdokimov D.V., Fedorov D.G. Research of thermal cycle parameters and surface condition of the samples from high-tension steel 30XГЧ2А at cylindrical external grinding // *Life Science Journal*. 2014 V. 11, Iss. 10. P. 678-681.
3. Klocke F., Gierlings S., Brockmann M., Veselovac D. Force-based temperature modeling for surface integrity prediction in broaching nickel-based alloys // *Procedia CIRP*. 2014 V. 13 P. 314-319. doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.053
4. Kolařík K., Pala Z., Čapek J., Beránek L., Vyskočil Z. Non-destructive inspection of surface integrity in milled turbine blades of inconel 738LC // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. V. 486. P. 9-15. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.486.9
5. Zhang Q., Mahfouf M., Yates J.R., Pinna C., Panoutsos G., Boumaiza S., Greene R.J., Luis de Leon Modeling and optimal design of machining-induced residual stresses in aluminum alloys using a fast hierarchical multiobjective optimization algorithm // *Materials and Manufacturing Processes*. 2011 V. 26, Iss. 3. P. 508-520. doi.org/10.1080/10426914.2010.537421
6. Liu W.W., Wang D.F., Li F., Chen H., Wang C.Z. Research on milling parameters optimization based on surface residual stress for aviation stainless steel // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. V. 526. P. 3-8. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.526.3
7. Кравченко Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке. Куйбышев: Куйбышевский политехнический институт, 1981. 90 с.
8. Кравченко Б.А., Кравченко А.Б. Физические аспекты теории процесса резания металлов. Самара: Самарский государственный технический университет, 2002. 167 с.
9. Benabid F., Benmoussa H., Arrouf M. A thermal modeling to predict and control the cutting temperature. The simulation of facemilling process // *Procedia Engineering*. 2014. V. 74. P. 37-42. doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.220
10. Zhang E., Zhao S., Chen X., Guo X., Yao J. Finite element analysis of indexable cutter // *Liaoning Gongcheng Jishu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) / Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*. 2013. V. 32, Iss. 12. P. 1695-1698. doi: 10.3969/j.issn.1008-0562.2013.12.025
11. Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
12. Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждение инструментов. М.: Машгиз, 1963. 200 с.
13. Сотникова К.Ф. Нормативы режимов резания на механическую обработку титановых сплавов. Кн.1. М.: НИАТ, 1980. 230 с.
14. Skuratov D.L., Zhidyaev A.N., Sazonov M.B. Solid carbide end mills tool life increase in titanium alloys machining by design development and rational choice of geometrical parameters // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. V. 9, Iss. 11. P. 767-770. doi: 10.3923/rjasci.2014.767.770
15. Резников Н.И. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
16. Кравченко Б.А. Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. 132 с.

### Информация об авторах

**Евдокимов Дмитрий Викторович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [dmitry.evd.ssau@gmail.com](mailto:dmitry.evd.ssau@gmail.com). Область научных интересов: исследование физики процесса фрезерования с целью повышения качества получаемых изделий.

**Скуратов Дмитрий Леонидович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий производства двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [skuratov@ssau.ru](mailto:skuratov@ssau.ru) Область научных интересов: исследование физических процессов при механической обработке материалов.

### INFLUENCE OF TOOL DETERIORATION ON THE DENSITY OF HEAT FLUX DISTRIBUTION IN THE CUTTING AREA IN END MILLING OF OT4 TITANIUM ALLOY

© 2015 D. V. Evdokimov, D. L. Skuratov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The influence of end mill teeth flank wear on the density of heat fluxes taking place in the cutting area is discussed in the paper. The following densities of heat fluxes are dealt with: the density of heat flux which occurs as a result of plastic deformation, the density of heat flux which occurs due to the friction of chips against the cutting face of the mill teeth and that which occurs as a result of flank surface friction against the workpiece being machined. The dependence of the cutting temperature on the value of the tool wear has been obtained. The thermal field in the tool has been calculated. The presented results of the numerical experiment have been obtained by a customized procedure that represents a revised procedure developed by Professor A.N. Resnikov for the conditions of endmilling. The article describes the main stages of adaptation. There are four of them, and they are based on the geometrical specificity of the chip. Immediate calculation of temperature fields in the cutting area in the endmilling process was performed using a computer finite - element model. The model takes into account the hydrodynamics of the cooling lubricant which, in most cases, takes place in endmilling and other machining processes.

*Density of heat flux, deformation, friction, carbide endmill, tool wearing, temperature in the cutting area.*

### References

1. Evdokimov D.V., Fedorov D.G. Skuratov D.L. Thermal Stress Research of Processing and Formation of Residual Stress When End Milling of a Workpiece. *World Applied Sciences Journal*. 2014. V. 31, Iss. 1. P. 51-55. doi: 10.5829/idosi.wasj.2014.31.01.14283
2. Skuratov D.L., Evdokimov D.V., Fedorov D.G. Research of thermal cycle parameters and surface condition of the samples from high-tension steel 30XГCH2A at cylindrical external grinding. *Life Science Journal*. 2014 V. 11, Iss. 10. P. 678-681.
3. Klocke F., Gierlings S., Brockmann M., Veselovac D. Force-based temperature modeling for surface integrity prediction in broaching nickel-based alloys. *Procedia CIRP*. 2014 V. 13. P. 314-319. doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.053
4. Kolařík K., Pala Z., Čapek J., Beránek L., Vyskočil Z. Non-destructive inspection of surface integrity in milled turbine blades of inconel 738LC. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. V. 486. P. 9-15. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.486.9

5. Zhang Q., Mahfouf M., Yates J.R., Pinna C., Panoutsos G., Boumaiza S., Greene R.J., Luis de Leon Modeling and optimal design of machining-induced residual stresses in aluminum alloys using a fast hierarchical multiobjective optimization algorithm. *Materials and Manufacturing Processes*. 2011 V. 26, Iss. 3. P. 508-520. doi.org/ 10.1080/10426914.2010.537421
6. Liu W.W., Wang D.F., Li F., Chen H., Wang C.Z. Research on milling parameters optimization based on surface residual stress for aviation stainless steel. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. V. 526. P. 3-8. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.526.3
7. Kravchenko B.A. *Teoriya formirovaniya poverkhnostnogo sloya detaley mashin pri mekhanicheskoy obrabotke* [Theory of the formation of the surface layer of machine parts in machining]. Kuybyshev: Kuybyshev Politechnical Institute Publ., 1981. 90 p.
8. Kravchenko B.A., Kravchenko A.B. *Fizicheskie aspekty teorii protsessa rezaniya metallov* [Physical aspects of the metal cutting process theory]. Samara: Samara State Technical University Publ., 2002. 167 p.
9. Benabid F., Benmoussa H., Arrouf M. A thermal modeling to predict and control the cutting temperature. The simulation of facemilling process. *Procedia Engineering*. 2014. V. 74. P. 37-42. doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.220
10. Zhang E., Zhao S., Chen X., Guo X., Yao J. Finite element analysis of indexable cutter. *Liaoning Gongcheng Jishu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*. 2013. V. 32, Iss. 12. P. 1695-1698. doi: 10.3969/j.issn.1008-0562.2013.12.025
11. Reznikov A.N. *Teplofizika rezaniya* [Thermal physics of cutting]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 288 p.
12. Reznikov A.N. *Teploobmen pri rezanii i okhlazhdenie instrumentov* [Heat exchange in cutting and cooling of tools]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 200 p.
13. Sotnikova K.F. *Normativy rezhimov rezaniya na mekhanicheskuyu obrabotku titanovykh splavov* [Guidelines on cutting modes for titanium alloy machining]. Moscow: NIAT Publ., 1980. 230 p.
14. Skuratov D.L., Zhidyaev A.N., Sazonov M.B. Solid carbide end mills tool life increase in titanium alloys machining by design development and rational choice of geometrical parameters. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. V. 9, Iss. 11. P. 767-770. doi: 10.3923/rjasci.2014.767.770
15. Reznikov N.I. *Obrabotka rezaniem zharoprochnykh, vysokoprochnykh i titanovykh splavov* [Machining of heat-resistant, high-strength and titanium alloys]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1971. 200 p.
16. Kravchenko B.A. Mitryaev K.F. *Obrabotka i vyнослиvost' vysokoprochnykh materialov* [Machining and endurance of high-strength materials]. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1968. 132 p.

#### About the authors

**Evdokimov Dmitriy Victorovich**, postgraduate student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [dmitry.evd.ssau@gmail.com](mailto:dmitry.evd.ssau@gmail.com). Area of Research: physics of the milling process with the aim of improving product quality.

**Skuratov Dmitriy Leonidovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [skuratov@ssau.ru](mailto:skuratov@ssau.ru). Area of Research: physical processes in material machining.