



УДК 669.14.018.252.3:621.9

Поступила 18.08.2017

К ВОПРОСУ ВЫБОРА НОМЕНКЛАТУРЫ ЛИТОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ON SELECTION OF CAST TOOL VARIETIES MADE OF HIGH-SPEED STEELS

А. С. ЧАУС, Словацкий технический университет, г. Братислава, Словакия.

E-mail: alexander.chaus@stuba.sk,

Ф. И. РУДНИЦКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,

М. БРАЧИК, Словацкий технический университет, г. Братислава, Словакия. E-mail: makej.bracik@stuba.sk

A. S. CHAUS, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia. E-mail: alexander.chaus@stuba.sk,

F. I. RUDNITSKI, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,

M. BRACÍK, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia. E-mail: makej.bracik@stuba.sk

В статье обоснован выбор номенклатуры режущего инструмента для внедрения в литом варианте. При правильном выборе стойкость литого инструмента из быстрорежущей стали может быть в 2 раза выше по сравнению с инструментом, изготовленным из проката.

The paper deals with the selection of metal-cutting varieties for application in the as-cast state. When a proper selection was carried out a tool life of the cast varieties made of high-speed steel could be 2 times higher compared with the tools manufactured of the wrought high-speed steels.

Ключевые слова. *Режущий инструмент, быстрорежущая сталь, литейная технология, номенклатура инструмента.*

Keywords. *Cutting tool, high-speed steel, foundry technology, tool varieties.*

Введение

Несмотря на более высокое качество катаного или кованого металла, изготовление металлорежущего инструмента с привлечением литейной технологии позволяет более рационально распоряжаться дорогостоящей быстрорежущей сталью за счет многократного использования инструментального скрапа и прямой утилизации различного вида отходов стали при переплаве. Имеет место и прямая экономия инструментального материала, обусловленная снижением массы литых заготовок, которые более точно копируют геометрию инструмента по сравнению с прокатом. В результате сокращения объема механической обработки снижаются энергоемкость и трудоемкость изготовления инструмента [1, 2]. При этом себестоимость литого инструмента на 30–50% ниже себестоимости аналогичного инструмента из деформированных быстрорежущих сталей, что в условиях рыночных отношений имеет первостепенное значение.

Еще больший экономический эффект достигается в результате повышения стойкости инструмента при замене деформированного металла литым [3–7], поскольку литая быстрорежущая сталь является природным композиционным материалом, в структуре которого сочетаются относительно пластичная металлическая основа и более твердый и прочный, пространственно разветвленный каркас эвтектических карбидов. Более того, в результате использования высоких скоростей охлаждения при получении инструмента литейной технологией появляется возможность исключить одну из операций термической обработки инструмента, а именно закалку [8, 9], что дополнительно удешевляет производство режущего инструмента. Однако широкое применение литых быстрорежущих сталей сдерживается их повышенной хрупкостью, что часто усугубляется неправильным выбором номенклатуры инструмента для внедрения в литом варианте. В связи с изложенным выше в настоящей работе рассматривается концепция обоснованного выбора номенклатуры литого режущего инструмента.

Условия работы и нагрузка режущего инструмента

Эксплуатация металлорежущего инструмента осуществляется в сложных условиях. В процессе резания в рабочей кромке инструмента возникают высокие контактные напряжения, значения которых могут достигать 4000 МПа [10] и даже 6000 МПа [11]. Чрезмерно высокие контактные напряжения вызывают не только пластическое течение инструментального материала в тонком поверхностном слое [7], но и пластическую деформацию режущего клина инструмента [10]. В то же время в местах инструмента, находящихся на некотором удалении от зоны контакта с обрабатываемой заготовкой, возникают напряжения изгиба и кручения. При недостаточной прочности инструментального материала это, как правило, служит причиной преждевременного выхода инструмента из строя вследствие поломки, скалывания или выкрашивания режущей кромки. Наличие ударных нагрузок и вибраций интенсифицирует эти процессы.

Самые высокие ударные нагрузки испытывает строгальный и долбежный инструмент. При обработке чугуна, бронз и других твердых и хрупких материалов, в том числе закаленных сталей, инструмент испытывает ударные нагрузки пульсирующего характера, что обусловлено образованием так называемой стружки «надлома». В силу специфики работы и конструкционных особенностей переменным ударным нагрузкам подвергается также многолезвийный инструмент и прежде всего фрезы. Однако фрезы с большим количеством зубьев, а также винтозубые, у которых осевой шаг равен или кратен в целых числах ширине обрабатываемой детали, работают в более спокойных условиях. При таком расположении зубьев хорошо гасится вибрация, приводящая к ударным нагрузкам. Следует отметить, что равномерность работы инструмента заметно возрастает при попутном фрезеровании; при встречном, напротив, существует большая вероятность возникновения вибрации и переменных ударных нагрузок [12]. С этой точки зрения в более спокойных условиях работает чистовой инструмент. Чистовая обработка проводится на высоких скоростях и при малой глубине резания. Перемещение по инструменту образующейся «сливной» стружки вызывает значительное трение, которое имеет место также между задней поверхностью инструмента и обрабатываемой заготовкой. Поэтому при чистовой обработке важна повышенная износостойкость инструментального материала. Повышенной износостойкостью должны обладать все зубо- и резцообрабатывающие инструменты, поскольку большая площадь контакта их рабочей поверхности с заготовкой также интенсифицирует изнашивание.

При черновой обработке для материала инструмента на первый план выдвигается его теплостойкость. Это объясняется тем, что повышенный съем металла, требующий больших затрат механической работы, сопровождается усиленным тепловыделением. Теплостойкость имеет первостепенное значение и при обработке материалов, относящихся к классу труднообрабатываемых (в первую очередь сталей и сплавов аустенитного класса), а также с низкой теплопроводностью, например, пластмасс. В этих случаях тепловые нагрузки на инструмент возрастают, что в свою очередь интенсифицирует его изнашивание.

Отмечаются различные виды изнашивания металлорежущего инструмента, которые по основным признакам можно отнести к двум типам: механическому и физико-механическому. К механическому относят пластическую деформацию режущей кромки, абразивный износ, вынос инструментального материала стружкой и микровыкрашивание [13, 14], ко второму типу – адгезионное и диффузионное взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов [10, 14, 15]. Возможны и другие механизмы изнашивания: образование окалина [16, 17], процессы химического взаимодействия контактных поверхностей инструмента [12, 14]. Однако в большинстве работ выделяют три механизма изнашивания режущего инструмента: абразивный, адгезионный и диффузионный [12, 14, 18, 19].

Таким образом, в зависимости от рода проводимых работ, свойств обрабатываемого материала и конструктивных особенностей конкретных типоразмеров металлорежущих инструментов существует большое количество операций механической обработки резанием, которые выполняются в относительно спокойных с точки зрения динамических нагрузок условиях работы, но одновременно требующих от инструментального материала повышенного сопротивления истиранию. При правильном выборе номенклатуры это создает предпосылки для успешной эксплуатации литого инструмента с учетом специфики его структуры и свойств. С точки зрения оценки правильности выбора номенклатуры для внедрения в литом варианте очень важным моментом является выявление преимущественных причин выхода инструментов из строя.

Анализ причин выхода из строя режущих инструментов

Для промышленных наблюдений и статистического анализа причин выхода инструмента из строя был выбран перечень режущих инструментов, включающий четыре наименования фасонных фрез раз-

личного назначения: фрезы цилиндрические со спиральными зубьями («спиральные»); резцы фасонные призматические и цилиндрические; зенкеры пластинчатые (табл. 1).

Таблица 1. Режимы резания инструмента

Инструмент	Глубина, мм	Подача, мм	Скорость, м/мин	Обрабатываемый материал	Охлаждающая среда
<i>Фрезы</i>					
Канавочные	–	1	22,6	P6M5, P6AM5	Масло
Спиночные	–	1,28	25,5	P6M5, P6AM5	Эмульсия
Одноугловые	–	0,84	22,6	P6M5, P6AM5	То же
Фасонные	6	0,06	35	38ХНМА	»
Цилиндрические	2	0,4	24	45ХН2МФА	»
<i>Резцы фасонные</i>					
Призматические	2,5	0,020	24,4	Сталь 45	Сульфозфрезол
Призматические	5,0	0,023	21,4	Сталь 40Х	То же
Цилиндрические	0,67	0,030	63	Сталь 10	Эмульсия
<i>Зенкеры</i>					
Пластинчатые	1	0,19	23,5	Сталь 45Х3	Эмульсия

Инструменты выбранных типоразмеров, как правило, используются на чистовых или получистовых операциях обработки, режимы резания которых исключают значительные ударные нагрузки. Все фрезы имеют относительно большое число зубьев. Однако на их примере видно, что имеющиеся различия в условиях эксплуатации – режимах резания, свойствах обрабатываемого материала – и в конструкционных особенностях обуславливают различное соотношение между преобладающими видами износа и причинами выхода инструмента из строя в каждом конкретном случае (табл. 2).

Таблица 2. Преимущественные причины выхода металлорежущего инструмента из строя (в процентном отношении)

Причины выхода из строя	Фрезы					Резцы	Зенкеры
	канавочные	спиночные	одноугловые	фасонные	цилиндрические	фасонные	пластинчатые
Поломка	0,5	0,5	4–7	2–4	1	0,5	2–3
Скалывание	3–5	2	3–6	1–2	1–2	1–3	1–3
Микровыкрашивание режущей кромки	1–2	6–8	4–6	2–3	1–2	4–14	2–4
Окислительно-абразивное истирание	61–63	66–68	51–54	62–64	64–66	52–56	47–48
Адгезионное истирание (схватывание)	10–15	12–13	14–16	16–19	12–14	10–18	12
Пластическая деформация (смятие и течение)	18–21	10–12	16–19	12–13	18	18–24	32–34

Фасонные фрезы («канавочные»), применяемые для нарезания канавок в заготовках спиральных сверл, работают в условиях интенсивного истирания, что связано как с их конструктивными особенностями, так и с природой обрабатываемого материала. Во-первых, задняя поверхность такой фрезы очерчена по архимедовой спирали, что не позволяет создать достаточно большой задний угол для уменьшения сил трения между зубом и поверхностью резания обрабатываемой заготовки. Во-вторых, значительная длина активной режущей кромки зуба увеличивает контактную площадь зоны трения сопрягаемой пары «инструмент-заготовка», а ее криволинейная форма затрудняет удаление стружки, что дополнительно интенсифицирует износ инструмента. И, наконец, очень сильное негативное влияние на процесс изнашивания оказывают присутствующие в структуре обрабатываемого материала – быстрорежущей стали – высокотвердые частицы карбидов MC и M_6C . Как следствие, интенсивное истирание является основной причиной выхода из строя фрез подобного типа.

Тем не менее, цифры, отражающие поломку и скалывание «канавочных» фрез, довольно велики (табл. 2). Это обусловлено рядом причин, важнейшими среди которых являются незапланированная, внезапная остановка станка; нарушение условий эксплуатации; наличие в партиях обрабатываемых изделий заготовок, отличающихся повышенной твердостью. В последнем случае поломке предшествует так называемая «тепловая посадка», в результате которой силы резания многократно возрастают, а с ними

и пиковые нагрузки на инструмент. Но для фрезы, профиль зуба которой очерчен по архимедовой спирали, характерна повышенная конструкционная прочность, из этого вытекает, что «канавочные» фрезы являются идеальным объектом для изготовления в литом варианте.

Для фасонных фрез («спиночные»), формирующих режущую кромку спиральных сверл, преобладающей причиной изъятия из эксплуатации также является истирание в условиях окислительно-абразивного изнашивания (табл. 2). Однако некоторые различия в геометрии и условиях работы «канавочных» и «спиночных» фрез, несмотря на одинаковую природу обрабатываемого материала, приводят к изменению соотношения между основными причинами выхода инструмента из строя. В частности, «спиночные» фрезы имеют небольшую высоту зуба, в результате чего глубина резания и объем снимаемого металла значительно меньше. Как следствие, число случаев, приходящихся на долю скалывания, сокращается по сравнению с «канавочными» фрезами. С другой стороны, ослабленная конструкция зуба – трапецеидальная – и меньший угол заострения режущей кромки являются причинами ее более интенсивного микрорывкрашивания (табл. 2).

Фасонные одногловые фрезы относятся к зубообрабатывающему инструменту, для которого, как отмечалось выше, характеристикой первостепенной важности является повышенная износостойкость их материала, что особенно актуально при обработке заготовок из быстрорежущей стали. Из рассматриваемых инструментов они в наибольшей степени подвержены поломке (табл. 2). Это объясняется ослабленной конструкцией зуба (трапецеидальной) и большой его высотой.

Фасонные фрезы для обработки заготовок из конструкционной стали, напротив, имеют зуб повышенной прочности, задняя поверхность которого очерчена по архимедовой спирали. Такая форма зуба по аналогии с «канавочными» фрезами обуславливает наличие сильного трения в контактной зоне и уменьшает вероятность поломок инструмента. Поломки наблюдаются лишь на заключительной стадии эксплуатации после неоднократных переточек, ослабляющих сечение зуба и увеличивающих силы трения за счет уменьшения заднего угла. Несмотря на более легкие по сравнению с другими инструментами условия резания (обрабатываемый материал – легированная конструкционная сталь), цифры, отражающие процент выхода инструмента из строя по причине адгезионного изнашивания, представляются довольно высокими (табл. 2), что однако может быть объяснено возросшей скоростью резания.

У цилиндрических фрез спиральное расположение зубьев и большое их количество способствуют безаварийной работе, которая сопровождается преимущественно естественным истиранием (табл. 2).

В условиях интенсивного изнашивания вследствие небольшого заднего угла осуществляется эксплуатация призматических и цилиндрических фасонных резцов (табл. 2). Особенно в этом плане выделяются цилиндрические резцы, у которых при установке их центра и центра обрабатываемой детали на одной линии $\alpha = 0$. Для уменьшения сил трения инструмент смещают выше уровня центра детали, однако возможности здесь весьма ограничены из-за усложнения профилирования резца и искажения геометрии обрабатываемой детали. Благодаря более прочной конструкции при прочих равных условиях запас прочности у призматических резцов выше, чем у цилиндрических.

Зенкеры пластинчатые в значительно меньшей степени подвержены поломке по сравнению с аналогичным длинномерным инструментом со стружечной канавкой. Это вполне объяснимо – они достаточно массивны и обладают большей жесткостью. С другой стороны, такая конструкция инструмента ухудшает условия отвода стружки, что усиливает истирающее воздействие на инструмент и способствует его более интенсивному разогреву и изнашиванию.

Выводы

На основании аналитической оценки конструкционных особенностей инструмента и технологических параметров резания, а также с учетом результатов промышленных наблюдений, позволивших выявить преобладающие причины выбраковки инструмента, была определена номенклатура инструмента для апробирования в литом варианте. Как правило, масса инструмента не превышала 1–2 кг. В связи с этим следует отметить, что меньшая масса литых заготовок позволяет эффективно управлять процессами формирования структуры и свойств быстрорежущей стали не только на стадии первичной кристаллизации расплава [20–25], но и при соответствующем подборе химического состава при последующей термической обработке [26–28]. Кроме того, при этом создаются предпосылки для использования явления структурной наследственности [2–4, 9, 29] при управлении структурой в системе «шихта–расплав–отливка инструмента».

Результаты промышленных испытаний показали, что при правильном выборе номенклатуры стойкость литого инструмента по сравнению со стандартным возрастает до 2 раз, что обусловлено, прежде всего, более высоким сопротивлением литого металла истиранию [5–7].

Литература

1. **Caus A., Beznak M., Caplovic L.** Foundry technologies and materials for cast cutting tools // *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium 2008*. P. 221–222.
2. **Caus A. S.** Cast metal-cutting tools made of high-speed steels. 1st ed. Dresden: Forschungszentrum Dresden – Rossendorf, 2010. 116 s.
3. **Hufenbach J., Helth A., Lee M.-H., Wendrock H., Giebeler L., Choe C.-Y., Kim K.-H., Kühn U., Kim T.-S., Eckert J.** Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of high-strength Fe85Cr4Mo8V2C1 cast steel // *Mater. Sci. Eng. A* 2016. Vol. 674. P. 366–374.
4. **Bleckmann M., Gleinig J., Hufenbach J., Wendrock H., Giebeler L., Zeisig J., Diekmann U., Eckert J., Kühn U.** Effect of cooling rate on the microstructure and properties of FeCrVC // *J. Alloys Compd.* 2015. Vol. 634. P. 200–207.
5. **Caus A. S.** Wear behavior of cast and rolled high-speed steel tools in turning // *J. Frict. Wear* 1999. Vol. 20, No 4. P. 30–33.
6. **Caus A. S.** Wear behavior of tools from cast and rolled high-speed steels at milling // *J. Frict. Wear* 2000. Vol. 21, No 4. P. 94–99.
7. **Caus A. S., Hudáková M.** Wear resistance of high-speed steels and cutting performance of tool related to structural factors // *Wear* 2009. Vol. 267. P. 1051–1055.
8. **Caus A. S., Rudnickii F. I.** Structure and properties of cast rapidly cooled high-speed steel R6M5 // *Met. Sci. Heat Treat.* 2003. Vol. 45, No 5–6. P. 157–162.
9. **Hufenbach J., Kunze K., Giebeler L., Gemming T., Wendrock H., Baldauf C., Kühn U., Hufenbach W., Eckert J.** The effect of boron on microstructure and mechanical properties of high-strength cast FeCrVC // *Mater. Sci. Eng. A* 2013. Vol. 586. P. 267–275.
10. **Astakhov V. P.** The assessment of cutting tool wear // *Int. J. Machine Tools Manuf.* 2004. Vol. 44. P. 637–647.
11. **Kose E., Kurt A., Seker U.** The effects of the feed rate on the cutting tool stresses in machining of Inconel 718 // *J. Mater. Process. Technol.* 2008. Vol. 196. P. 165–173.
12. **Astakhov V. P.** Tribology of cutting tools, in: P. J. Davim (Ed.), *Tribology in Manufacturing Technology*, Springer, New York, 2013. P. 1–66.
13. **Ji Y. P., Wu S. J., Xu L. J., Li Y., Wei S. Z.** Effect of carbon contents on dry sliding wear behavior of high vanadium high speed steel // *Wear* 2012. Vol. 294–295. P. 239–245
14. **Лоладзе Т. Н.** Износ режущего инструмента. М.: Машгиз, 1958. 356 с.
15. **Olortegui-Yume J. A., Kwon P. Y.** Tool wear mechanisms in machining // *Int. J. Mach. Mach. Mater.* 2007. Vol. 2, No. 3. P. 316–334.
16. **Vardavoulias M.** The role of hard 2-nd phases in the mild oxidational wear of high-speed steel-based materials // *Wear*. 1994. Vol. 173, No 1–2. P. 105–114.
17. **Garza-Montes-de-Oca N. F., Ra Inforth W. M.** Wear mechanisms experienced by a work roll grade high speed steel under different environmental conditions // *Wear* 2009. Vol. 267. P. 441–448.
18. **Badisch E., Mitterer C.** Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance // *Trib. Int.* 2003. Vol. 36, No 10. P. 765–770.
19. **Zhang M. Z., Liu Y. B., Zhou H.** Wear mechanism maps of uncoated HSS tools drilling die-cast aluminum alloy // *Trib. Int.* 2001. Vol. 34, No 11. P. 727–731.
20. **Caus A. S., Rudnickii F. I.** Effect of modification on the structure and properties of cast tungsten-molybdenum high-speed steels // *Met. Sci. Heat Treat.* 1989. Vol. 31, No 1–2. P. 121–128.
21. **Kheirandish S.** Effect of Ti and Nb on the formation of carbides and the mechanical properties in as-cast AISI-M7 high-speed steel // *ISIJ Int.* 2001. Vol. 41, No 12. P. 1502–1509.
22. **Feng Z. J., Du Z. Z., Fu H. G.** Effect of RE-Ti compound modification on microstructure and properties of high vanadium high speed steel // *J. Iron Steel Res.* 2009, Vol. 21, No 10. P. 48–50 + 59.
23. **Caus A. S.** Effect of boron on cast tungsten-molybdenum high-speed steels // *Phys. Met. Metallogr.* 2001. Vol. 91, No 5. P. 463–473.
24. **Caus A. S., Rudnickii F. I., Bogachik M., Úradník P.** Special features of microstructure of W – Mo high-speed steel modified with titanium diboride // *Met. Sci. Heat Treat.* 2011. Vol. 52, No 11–12. P. 575–580.
25. **Caus A. S., Porubski Ya.** Effect of modifying tungsten additions on formation of primary structure of R6M5-type high-speed steel // *Phys. Met. Metall.* 2012. Vol. 113, No 11. P. 1068–1078.
26. **Caus A. S., Porubski J.** Effect of heat treatment on the structure of cast high-speed steel of type R6M5 modified with tungsten additives // *Met. Sci. Heat Treat.* 2014. Vol. 55, No 11–12. P. 583–591.
27. **Caus A. S., Bogachik M., Uradnik P.** Structural transformations during heat treatment of W-Mo cast high-speed steel modified using titanium diboride // *Phys. Met. Metallogr.* 2011. Vol. 112, No 5. P. 470–479.
28. **Caus A. S.** Microstructural and properties evaluation of M2 high speed steel after inoculating addition of powder W and WC // *Mater. Sci. Technol.* 2014. Vol. 30, Iss. 9. P. 1105–1115.
29. **Caus A. S., Rudnickii F. I., Murgas M.** Structural inheritance and special features of fracture of high-speed steels // *Met. Sci. Heat Treat.* 1997. Vol. 39, No 1–2. P. 53–56.