

Чаус А.С., Легерска М., Хованец Й.

## О ВЫБОРЕ НОМЕНКЛАТУРЫ ЛИТОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*Словацкий технический университет  
Трнава, Словакия*

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 инструмент по сравнению с прокатом. В результате сокращения объема механической обработки снижаются энергоемкость и трудоемкость изготовления инструмента [1-4]. 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, 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. Однако широкое применение литого металла сдерживается его повышенной хрупкостью, что часто усугубляется неправильным выбором номенклатуры инструмента для внедрения в литом варианте. В связи с вышеизложенным в настоящей работе рассматривается концепция обоснованного выбора номенклатуры литого инструмента.

Эксплуатация металлорежущего инструмента осуществляется в сложных условиях. В процессе резания в рабочей кромке инструмента возникают высокие контактные напряжения (700 МПа) и давление 800 (МПа) [5, 6], значения которых согласно другим данным могут достигать соответственно 4000 МПа и >1700-1800 МПа [7]. Чрезмерно высокие напряжения вызывают пластическое течение инструментального материала в тонком поверхностном слое [8].

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, весь инструмент испытывает ударные нагрузки пульсирующего характера, что обусловлено образованием так называемой стружки "надлома".

В силу специфики работы и конструктивных 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, создающая ударные нагрузки. Следует отметить, что равномерность работы инструмента заметно возрастает при попутном фрезеровании; при встречном, напротив, существует большая вероятность возникновения вибрации и переменных ударных нагрузок [9].

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 зубообрабатывающие и резьбообрабатывающие 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 свести к двум типам: механическому и физико-механическому. К механическому относят пластическую деформацию режущей кромки, абразивный износ, вынос инструментального материала стружкой и микровыкрашивание, ко второму типу – адгезионное и диф-

фузионное взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов [10, 11]. Возможны и другие механизмы изнашивания: образование окалины [12], процессы химического взаимодействия контактных поверхностей инструмента [11]. Однако в большинстве работ выделяют три механизма изнашивания режущего инструмента: абразивный, адгезионный и диффузионный [5, 6, 13-17].

Таким образом, в зависимости от рода выполняемых работ, свойств обрабатываемого материала и конструктивных особенностей конкретных типов-размеров 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.

Для промышленных наблюдений и статистического анализа причин выхода инструмента из строя был выбран перечень режущих инструментов, включающий: четыре наименования фасонных фрез различного назначения; фрезы цилиндрические со спиральными зубьями (далее – "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
<b>Фрезы</b>					
канавочные	—	1	22,6	Р6М5, Р6АМ5	масло
спиночные	—	1,28	25,5	Р6М5, Р6АМ5	эмульсия
одноугловые	—	0,84	22,6	Р6М5, Р6АМ5	эмульсия
фасонные	6	0,06	35	38ХНМА	эмульсия
цилиндрические	2	0,4	24	45ХН2МФА	эмульсия
<b>Резцы фасонные</b>					
призматические	2,5	0,020	24,4	сталь 45	сульфофрезол
призматические	5,0	0,023	21,4	сталь 40Х	сульфофрезол
цилиндрические	0,67	0,030	63	сталь 10	эмульсия
<b>Зенкеры</b>					
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).

Фасонные фрезы – далее "канавочные", применяемые для нарезания канавок в заготовках спиральных сверл, работают в условиях интенсивного истирания, что связано как с их конструкционными 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 (см. 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 чего вытекает, что "канавочные" фрезы являются идеальным объектом для изготовления в литом варианте.

Для фасонных фрез – далее "спиночные", формирующих режущую кромку спиральных сверл, преобладающей причиной изъятия из эксплуатации также является истирание в условиях окислительно-абразивного изнашивания (см. табл. 2). Однако некоторые различия в геометрии и в 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 – трапециидальная – и меньший угол заострения режущей кромки являются причинами ее более интенсивного микровыкрашивания (см. 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 одноугловые 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 (см. табл. 2). Это объясняется ослабленной конструкцией зуба (трапециидальной) 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 за-

ключительной 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 (см. табл. 2), что, однако может быть объяснено возросшей скоростью резания.

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

В условиях интенсивного изнашивания вследствие небольшого заднего угла осуществляется эксплуатация призматических и цилиндрических фасонных резцов (см. 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 [18]. 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.

Таким образом, на основании аналитической оценки конструкционных особенностей 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 этой связи следует отметить, что меньшая масса литых заготовок позволяет эффективно управлять процессами формирования структуры и свойств быстрорежущей стали не только на стадии первичной кристаллизации расплава [19-22], но и при соответствующем подборе химического состава при последующей термической обработке [23, 24]. Кроме того, при этом создаются предпосылки для использования явления структурной наследственности [25] при управлении структурой в системе "шихта – расплав – отливка инструмента".

Результаты промышленных испытаний показали, что при правильном выборе номенклатуры стойкость литого инструмента по сравнению со стан-

дартным возрастает до 2 раз, что обусловлено, прежде всего, более высоким сопротивлением литого металла истиранию [26-28].

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке по проекту VEGA № 1/0306/03.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Beznák M. Výroba kovacieho náradia presným liatím metódou SHAW // Výroba, renovácia a povrchové úpravy nástrojov pre zápusťkové kovanie: Proc. of the Conf.:—Stupava, ČSVTS, 1988.—3. časť.
2. Beznák M. Main aspects influencing the technology of precision ceramic moulds // CO - MAT - TECH 2003: Proc. of the Intern. Conf.:—Bratislava, STU, 2003.—Vol. 1.—P. 30–37.
3. Beznák M. Precision casting into ceramic moulds for forging and pressing tools production // Akademičká Dubnica 2004: Proc. of the Intern. Conf.:—Bratislava: STU, 2004.—Vol. 1.—P. 33–36.
4. Beznák M. Possibilities of forging die inserts production by precision casting using permanent pattern // Spolupráca 2004: Proc. of the Intern. Conf.:—Žilina: ŽU, 2004.—S. 97–102.
5. Green W. New life for cutting tools // Tooling.—1979.—Vol. 33, № 12.—P. 33–37.
6. Klaus F., König W., Luckerath W., Siebel H. Stand der Kenntnisse über die Zerspanbarkeit der Stähle // Stahl und Eisen.—1965.—№ 85.—S. 1169–1186.
7. Геллер Ю.А. Инструментальные стали.—М.: Металлургия. 1983.—527 с.
8. Бельский С.Е., Тофпенек Р.Л. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента.—Минск: Наука и техника. 1984.—128 с.
9. Ezugwu E.O., Lai C.I. Failure modes and wear mechanisms of M35 high-speed steel drills when machining inconel-901 // Journal of materials processing technology.—1995.—Vol. 49, Iss. 3-4.—P. 295–312.
10. Скрынченко Ю.М., Позняк Л.А. Работоспособность и свойства инструментальных сталей.—Киев: Навукова думка, 1979.—168 с.
11. Bruno A. Problemi di usura negli utensili // Giornale dell 'Officina.—1972.—Vol. 17, № 7.—P. 21–26.
12. 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.
13. Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента.—М.: Машгиз, 1958.—356 с.
14. Кабалдин Ю.Г., Кожевников Н.Е., Кравчук К.В. Исследование изнашивания режущей части инструмента из быстрорежущей стали // Трение и износ.—1990.—Т. 11, № 1.—С. 130-135.
15. Badisch E., Mitterer C. Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance // Tribology international.—2003.—Vol. 36, Iss. 10.—P. 765–770.
16. Zhang M.Z, Liu Y.B, Zhou H. Wear mechanism maps of uncoated HSS tools drilling die-cast aluminum alloy // Tribology international.—2001.—Vol. 34, Iss. 11.—P. 727–731.
17. Venkatesh V.C. On a diffusion wear model for high-speed tools // Trans. ASMEJ. Lubric Technol.—1978.—Vol. 100, № 2.—P. 436–441.
18. Бельский С.Е. Исследование структурных факторов, опреде-

ляющих эксплуатационную стойкость режущего инструмента из сталей типа Р6М5: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Физико-техн. ин-т АН БССР.–Минск, 1980.–20 с. 19. Chaus A.S., Rudnickii F.I. Effect of modification on the structure and properties of cast tungsten-molybdenum high-speed steels // Metal Science and Heat Treatment.–1989.–Vol. 31, Nos. 1–2. P. 121–128. 20. Chaus A.S. The Formation of Structure in as-cast High-speed Steels during Primary Solidification // Technology 97: Proc. of the Intern. Conf.–Bratislava, STU, 1997.–Vol. 1.–P. 312–318. 21. Chaus A.S. On the prospects of the use of low-alloy tungsten-free high-speed steel 11M5F for cast tools // Metal Science and Heat Treatment.–1998.–Vol. 40, Nos 7–8.–P. 319–325. 22. Chaus A.S. Effect of modification and alloying on wear resistance of high-speed steels // Journal of Friction and Wear.–1999.–Vol. 20, No 3, p. 83–89. 23. Chaus A.S., Latyshev I.V. Effect of vanadium, titanium, and niobium on the structure and properties of cast tungsten-molybdenum high-speed steels // The Physics of Metals and Metallography.–1999.–Vol. 88, No 5. P. 462–468. 24. Chaus A. S., Murgas M., Latyshev I.V., Toth R. Thermal treatment of cast carburised high-speed steel alloyed with Ti, Nb and V // Metal Science and Heat Treatment.–2001.–Vol. 43, Nos 5–6. 25. Chaus A.S., Rudnickii F.I., Murgas M. Structural inheritance and special features of fracture of high-speed steels // Metal Science and Heat Treatment.–1997.–Vol. 39, Nos. 1–2. P. 53–56. 26. Chaus A.S. Wear behavior of cast and rolled high-speed steel tools in turning // Journal of Friction and Wear.–1999.–Vol. 20, No 4. P. 30–33. 27. Chaus A.S. Wear behavior of tools from cast and rolled high-speed steels at milling // Journal of Friction and Wear.–2000.–Vol. 21, No 4. P. 94–99. 28. Chaus A.S. Wear behavior of tools from cast and rolled high-speed steels // CO - MAT - TECH 2002: Proc. of the Intern. Conf.:–Bratislava, STU, 2002.–Vol. 1.–P. 30–37.

УДК 621.91.04

**Данилов В.А., Терентьев В.А.**

## **АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

*Полоцкий государственный университет  
Новополоцк, Беларусь*

Зубчатые передачи находят широкое применение в самых разнообразных машинах и механизмах в различных отраслях промышленности. Постоянный рост промышленного производства влечет за собой постоянное увеличение объема и номенклатуры производимых зубчатых колес.