

Носко С. В.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГИДРОДИНАМИКА НЕСТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПОТОКА НЕНЬЮТОНОВСКИХ СРЕД В РАБОЧИХ КАНАЛАХ ФОРМОВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы, связанные с реологическим поведением степенных сред в каналах формовочного оборудования. В результате обработки данных реометрических исследований получены значения параметров реологического уравнения и установлена их зависимость от гидромеханических и температурных режимов перерабатываемых сред. Показано, что длина участка гидродинамической стабилизации потока зависит от реологических свойств среды и условий входа в рабочие каналы формовочного оборудования.

Ключевые слова: реологические свойства, нестабилизированное течение, каналы переменной геометрии.

1. Введение

Одним из наиболее эффективных способов повышения производства вискозных волокон является процесс высокоскоростного формования направленный на повышение производительности оборудования и расширения ассортимента выпускаемой продукции. Данное направление вызывает необходимость в разработке нового и усовершенствовании существующего оборудования [1, 2].

Несмотря на разнообразие конструкций формовочных машин их транспортные магистрали (раславопроводы) представляют собой каналы с переменной геометрией и включают, необходимые для обеспечения технологического процесса, вспомогательное оборудование вызывающее дополнительные потери давления связанные с дестабилизацией потока.

В связи с этим, для обеспечения рациональных режимов технологического процесса, значительное внимание необходимо уделять реологии формовочной среды и гидродинамическим особенностям нестабилизированного потока в рабочих каналах формовочного оборудования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Результаты исследований физико-химических, реологических и теплофизических свойств волокнообразующих материалов приведенные в работах [3, 4] показали, что вискозы начиная с концентрации целлюлозы 0,5–1 %, как и растворы других полимеров, не подчиняются реологическому закону Ньютона. Наличие структурной сетки в вискозах приводит к появлению у них как вязкоэластичных, так и упругих свойств. Такая среда может быть отнесена к вязкоупругим или эластичным жидкостям и в первом приближении ее реологическое поведение обычно представляют моделью Максвелла.

Имеющиеся в литературе [3] данные свидетельствуют о том, что при больших вязкостях растворов вискоз

и высоких скоростях истечения через формующие фильеры проявляется эффект эластичной турбулентности и наблюдается образование спиралевидных скрученных струй на выходе. Данный эффект достаточно полно исследован для процессов экструзионной переработки расплавов полимеров и его необходимо учитывать и при выборе гидродинамических параметров формования вискозных волокон.

В ходе технологического процесса получения и формования вискоз происходит как деформация сдвига, имеющая место при гомогенизации, фильтрации и течении вискоз в рабочих каналах оборудования, так и продольная деформация, выражающаяся при фильерном вытягивании вискозных нитей.

В работах [2, 4, 5] показано, что с увеличением напряжения сдвига происходит разрушение структурной сетки растворов вискоз и их вязкость падает. Это характерно для вязко-пластичных жидкостных структур и в диапазоне скоростей сдвига, соответствующих геометрическим размерам рабочих каналов оборудования, данные среды, с достаточной для практических расчетов точностью могут быть описаны степенным реологическим законом Оствальда де Вилля.

Из технологической практики [2, 3] известно, что стабильность формования и качество получаемого волокна во многом определяется не только реологическими свойствами формовочной среды, но и гидродинамическими характеристиками потока в рабочих каналах оборудования.

В связи с этим, необходимо провести краткий анализ современного состояния задачи связанной с построением математических моделей нестабилизированного течения вязких и аномально-вязких сред на гидродинамическом начальном участке каналов формовочных машин.

Теоретические исследования течения вязких и аномально-вязких жидкостей на начальном участке представлены авторами [6–8]. В данных работах получены решения уравнений движения при упрощенных допу-

щениях и дополнительных ограничениях. В уравнениях Навье-Стокса пренебрегают членами, характеризующими силы инерции в потоке, а в качестве начальных условий принимают прямоугольную форму эпюры скоростей на входе в начальный участок. Полученные результаты, в данной постановке, справедливы для отдельных частных случаев течения, а при решении большинства практических задач приводят к существенным количественным расхождениям с экспериментальными данными.

В связи со сложностью построения математических моделей исследуемых течений, многие авторы, при решении данной задачи, обращаются к численному эксперименту, с помощью которого можно определить значения всех искомым переменных (скорость, давление, температура, степень турбулентности) во всей исследуемой области решения.

Работы [9–12] посвящены изучению динамики неустойчивых течений в формующих каналах неньютоновских жидкостей с учетом неизотермичности и эффекта пристенного скольжения. Авторами разработаны математические модели, вычислительные алгоритмы и программы для расчета изометрических и неизометрических потоков вязкоупругих жидкостей с использованием реологических уравнений. Установлено значение объемного расхода, при котором происходит переход течения с прилипанием к течению с проскальзыванием на стенках канала (срыв потока) и образование застойных зон в угловых областях формующей головки экструдера.

В работе [13, 14] при численном моделировании течений во входном канале формующей головки установлено, что упругие свойства полимерной смеси существенно влияют на форму и размеры вихревых областей, образующихся в угловых зонах формующей головки. Показано, что срыв вихревых потоков в основное течение приводит к неоднородности механических свойств изделий химической технологии. Для устранения вихреобразования в работе [13] предлагается использовать профилирование входного участка формующей головки экструдера. Автор так же отмечает, что, несмотря на практическую важность данной задачи, количество теоретических и экспериментальных данных, позволяющих однозначно определить причины неустойчивости экструдера, до сих пор недостаточно.

Представленные выше работы в основном посвящены исследованию процессов экструзионной переработки полимерных расплавов и резинотехнических смесей. В данных технологических процессах движение вязкоупругих сред, в формующих каналах, происходит при медленном сдвиговом течении или в режиме ползущего течения и силы инерции в потоке не оказывают существенного влияния на гидродинамические характеристики.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — процессы неустойчивого течения аномально-вязких сред в каналах с переменной геометрией.

Цель исследования — экспериментально исследовать влияние реологических свойств жидкости и гидродинамических условий входа в начальный участок канала на дестабилизацию потока.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Исследовать реологические характеристики модельных жидкостей на ротационном вискозиметре в диапазоне скоростей сдвига перекрывающего значения, полученные на экспериментальном стенде.
2. Рассчитать параметры аппроксимирующих уравнений для реологических кривых растворов КМЦ различной концентрации. Установить функциональную зависимость эффективной вязкости и констант реологического уравнения от скорости сдвига и температуры.
3. Провести экспериментальные исследования течения аномально-вязких сред при различных гидродинамических условиях входа в начальный участок каналов с резко изменяющейся геометрией и сопоставить полученные опытные данные с результатами аналитических решений уравнений движения.

4. Результаты исследования реологических свойств и гидродинамики неустойчивого потока неньютоновских сред в рабочих каналах оборудования

В связи с тем, что экспериментальные исследования на полномасштабной формовочной установке дороги и в большинстве случаев практически не возможны, то опыты по изучению структуры неустойчивых потоков в каналах переменной геометрии, с использованием методов визуализации, проводились на лабораторном стенде [15].

В качестве модельных жидкостей использовались водные растворы натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) различной концентрации.

Исследования реологических характеристик модельных жидкостей проводились на ротационном вискозиметре «Реотест-2» с измерительным узлом в виде коаксиальных цилиндров, которые были помещены в систему термостатирования, с внешним термостатом. Данный вискозиметр позволил получить достаточную реологическую информацию в диапазоне скоростей сдвига (от 9 до 1312 с⁻¹) перекрывающего значения, полученные в экспериментальной установке при температурах от +20 до +120 °С.

С помощью ЭВМ были вычислены параметры аппроксимирующих уравнений для реологических кривых растворов КМЦ различной концентрации, которые описываются уравнением Оствальда де Вилля:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где τ — напряжение сдвига, н/м²; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига, с⁻¹; k — константа консистентности; n — индекс течения.

На графиках рис. 1 изображены экспериментально полученные точки, а так же аппроксимирующие их реологические кривые для различных концентраций растворов КМЦ.

В логарифмических координатах зависимости между напряжением сдвига и его скоростью, для всех растворов КМЦ, линейные с коэффициентом корреляции от 0,95 до 0,99, что дает возможность с достаточной точностью определить значение коэффициентов k и n в уравнении (1).

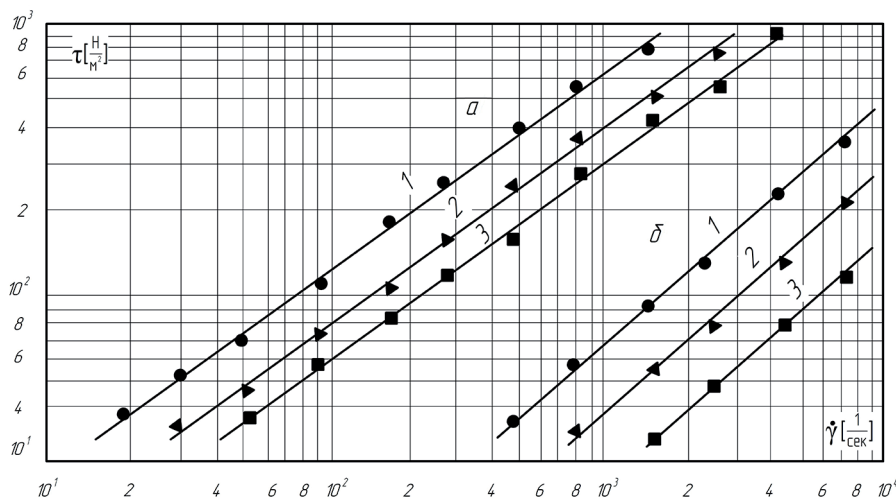


Рис. 1. Зависимость напряжений сдвига (τ) от скорости сдвига ($\dot{\gamma}$) для растворов КМЦ в воде различных концентраций: а — концентрация 10 %; б — 3 %; 1 — при температуре 20 °С; 2 — 30 °С; 3 — 40 °С

Из представленных в табл. 1 опытных данных видно, что эффективная вязкость, определяемая в потоке неньютоновской жидкости как $\mu_{эф.} = \tau/\dot{\gamma}$ уменьшается с увеличением скорости сдвига при постоянной температуре (что подтверждает их псевдопластичность, как и перерабатываемых сред вискоз).

Таблица 1

Зависимость вязкости от скорости сдвига при 20 °С

Концентрация раствора КМЦ, %	Градиент скорости, с ⁻¹	Коэффициент динамической вязкости, Н·с/м ²
3 % водный раствор КМЦ	5,4	0,1185
	16,2	0,0789
	48,6	0,0657
	145,8	0,0613
10 % водный раствор КМЦ	1,0	2,2449
	3,0	1,8173
	9,0	1,3184
	48,6	0,8578
	81,0	0,7443

В пределах исследованного температурного интервала показатель n , характеризующий степень неньютоновского поведения, показатель консистенции k и вязкость при градиентном течении является функцией температуры для определенной концентрации растворов КМЦ (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость реологических параметров от температуры при фиксированной скорости сдвига

Концентрация раствора КМЦ, %	Параметры	Температура T, °С			
		20	25	30	40
3 %-раствор	μ , Н·с/м ²	0,0657	0,0526	0,0479	0,0241
	k , МПа·с	68,72	40,04	18,68	7,89
	n	0,967	0,914	0,882	0,820
10 %-раствор	μ , Н·с/м ²	0,8578	0,6599	0,5411	0,3827
	k , МПа·с	100,30	78,04	30,25	10,38
	n	0,752	0,731	0,702	0,698

С учетом зависимости реологических констант от температуры степенное реологическое уравнение (1) в обобщенном виде можно представить в виде:

$$\tau = k(T) \cdot \dot{\gamma}^{n(T)} \tag{2}$$

Для сопоставления результатов аналитического решения уравнений нестабилизированного течения [16], были проведены экспериментальные исследования течения вязких и аномально-вязких сред при различных условиях входа в гидродинамический начальный участок каналов сложной геометрической конфигурации.

Условия в конце участка гидродинамической стабилизации L_H (при $x = L_H$) для неньютоновской жидкости, описывающее эпюру скоростей, характерную для полностью развитого, стабилизированного потока [16]:

$$U_x(C) = \frac{3}{2} U_{x\text{cp.}} \left[1 - \left(\frac{y}{D_{\text{пр.}}} \right)^2 \right], \tag{3}$$

где U_x — составляющая скорости; x, y — продольная и поперечная координата канала соответственно; $D_{\text{пр.}}$ — приведенный диаметр канала.

Используя условия (3) на рис. 2 представлено сопоставление аналитических решений [16] и полученных экспериментальных данных для длины гидродинамического начального участка при различных условиях входа.

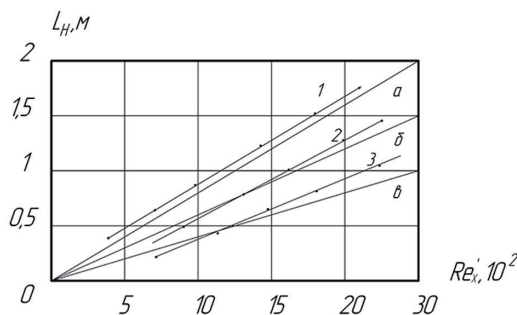


Рис. 2. Зависимость длины гидродинамического начального участка от числа Рейнольдса: 1, 2, 3 — экспериментальные данные; данные [16]: а — $m = 4$; б — $m = 3$; в — $m = 2$

Для ламинарного течения псевдопластичных сред условие в конце участка гидродинамической стабилизации принимает следующий вид:

$$U_x(y) = \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{k \cdot l} \frac{\partial P}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{D_{\text{пр.}}}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} - y^{\frac{n+1}{n}} \right], \tag{4}$$

где l — длина канала; $\partial P/\partial x$ — перепад давления для стабилизированного течения.

Выражение для определения потерь на гидродинамическом начальном участке можно представить как потери давления, обусловленные поверхностным трением при стабилизированном течении и дополнительных потерь энергии, связанных со структурой потока, т. е. наличием сил инерции:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{\text{ин.}} = \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{\text{ст.}} + \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{\text{доп.}} \quad (5)$$

На рис. 3 показана зависимость дополнительного параметра характеризующего проявление инерционных сил в потоке от индекса течения полученная опытным путем.

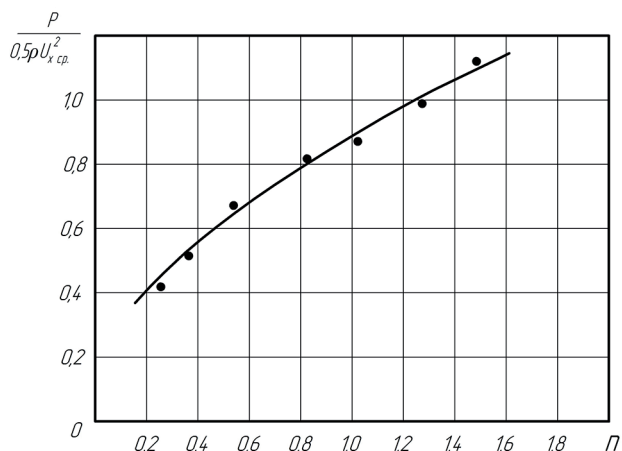


Рис. 3. Зависимость дополнительного параметра характеризующего проявление сил инерции в потоке на начальном участке канала после внезапного сужения (коэффициент сужения $k_0 = 3$) от индекса течения

Представленные в работе результаты реологических исследований могут быть использованы для выбора оптимальных гидромеханических и температурных режимов работы оборудования для высокоскоростного формирования вязкоэластичных изделий. Полученные опытные данные при течении жидкости в трубопроводах различной геометрической конфигурации позволяют учесть особенности дестабилизированного потока и повысить эффективность технологического процесса формирования.

5. Обсуждение результатов реологических исследований

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований выделены следующие основные отличия в особенностях нестационарного течения неньютоновских сред на гидродинамическом начальном участке:

- для сред подчиняющихся степенному реологическому закону, эффект влияния неньютоновского поведения на величину дополнительного параметра характеризующего проявление инерционных сил в потоке (определяемого из соотношения $\Delta P / 0,5\rho U_{x,ср.}^2$) выражен довольно резко и может быть принято, с приемлемой для практических расчетов степенью точности, линейной функцией индекса течения в указанном интервале изменения n ;
- на основании результатов экспериментальных исследований удалось установить зависимость дли-

ны участка нестационарного течения от кинематических характеристик потока в его начальном сечении;

— на основании проведенных экспериментальных исследований можно считать, ранее полученные аналитические зависимости по определению параметров дестабилизированных течений обоснованными и использованными при разработке методики гидродинамического расчета рабочих каналов оборудования химической технологии.

К недостаткам исследований, можно отнести расхождение, полученные при сопоставлении экспериментальных данных с результатами аналитического решения при определении длины гидродинамического начального участка. Данное расхождение 12 %, объясняется отличием формы эпюр скоростей, на входе полученных в опытах, при помощи профильных вставок и аппроксимированных полиномом в теоретических расчетах.

Настоящая статья является частью работы по созданию методики гидродинамического расчета нестационарных течений аномально-вязких сред в каналах переменной геометрии.

Не исследованными полностью являются процессы нестационарного течения в формирующих каналах реологически сложных жидкостей (вязкоупругих, бингамовских сред) и влияние времени их пребывания в каналах на стабильность свойств получаемых изделий.

6. Выводы

1. Получены значения параметров реологического уравнения и установлена их зависимость от значения скорости сдвига и температурных режимов перерабатываемой среды.
2. Показано, что выбор значения эффективной вязкости перерабатываемого материала и температуры его нагрева влияет на режимные показатели работы оборудования.
3. Установлено, что степень дестабилизации потока в каналах с изменяющейся геометрией, зависит от реологических свойств жидкости и гидродинамических условий входа в начальный участок.
4. Проведенные реологические исследования позволяют выбрать рабочие значения гидромеханических и температурных показателей перерабатываемой среды, обеспечить рациональные условия работы оборудования, и уменьшить общие энергозатраты при высокоскоростном формировании вязкоэластичных волокон.

Литература

1. Янков, В. Процессы переработки волокнообразующих полимеров (методы расчета) [Текст] / В. Янков, В. П. Первадчук, В. И. Боярченко. — М.: Химия, 1989. — 320 с.
2. Серков, А. Т. Вязкоэластичные волокна [Текст] / А. Т. Серков. — М.: Химия, 1981. — 296 с.
3. Перепелкин, К. Е. Физико-химические основы процессов формирования химических волокон [Текст] / К. Е. Перепелкин. — М.: Химия, 1978. — 180 с.
4. Зябицкий, А. В. Высокоскоростное формирование волокон [Текст] / А. В. Зябицкий, Х. Ковач. — М.: Химия, 1989. — 480 с.
5. Коховская, Т. Н. Исследование вязкости расплавов полимеров [Текст] / Т. Н. Коховская // Коллоидная химия. — 1996. — № 2. — С. 188–192.
6. Тарг, С. М. Основные задачи теории ламинарных течений [Текст] / С. М. Тарг. — М.: Наука, 1961. — 370 с.

7. Tachibana, M. Steady Laminar Flow in the Inlet Region of Rectangular Ducts [Text] / M. Tachibana, Y. Iemoto // Bulletin of JSME. — 1981. — Vol. 24, № 193. — P. 1151–1158. doi:10.1299/jsme1958.24.1151
8. Торнер, Р. Б. Основные процессы переработки полимеров [Текст] / Р. Б. Торнер. — М.: Химия, 1972. — 452 с.
9. Снигерев, Б. А. Неизотермическое ползущее течение вязкоупругой жидкости при формировании волокон [Текст] / Б. А. Снигерев, Ф. Х. Тазюков // Вестник Удмуртского университета. Серия математика, механика, информатика. — 2010. — Т. 2. — С. 101–108.
10. Mackley, M. R. Surface instabilities during the extrusion of linear low density polyethylene [Text] / M. R. Mackley, R. P. G. Rutgers, D. G. Gilbert // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. — 1998. — Vol. 76, № 1–3. — P. 281–297. doi:10.1016/s0377-0257(97)00122-5
11. Гарифуллин, Ф. А. Математическое моделирование процесса прядения нити из расплава полимера в условиях неизотермичности [Текст] / Ф. А. Гарифуллин, Ф. Х. Тазюков // Вестник Казанского технологического университета. — 2002. — № 1–2. — С. 187–193.
12. Снигерев, Б. А. Усиленное моделирование ламинарных течений разбавленных растворов полимеров [Текст] / Б. А. Снигерев, Ф. Х. Тазюков // Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии. — Казань: КГТУ, 2005. — С. 137–142.
13. Кутузов, А. Г. Выбор конфигурации входного участка формующей головки экструдера [Текст] / А. Г. Кутузов // Вестник Казанского государственного технического университета. — 2007. — № 2. — С. 49–51.
14. Boger, D. V. Further observations of elastic effects in tubular entry flows [Text] / D. V. Boger, D. U. Hur, R. J. Binnington // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. — 1986. — Vol. 20. — P. 31–49. doi:10.1016/0377-0257(86)80014-3
15. Носко, С. В. Исследование кинематических характеристик потока в каналах литниковой системы, методами визуализации [Текст] / С. В. Носко, В. А. Мосийчук // Вестник Киевского политехнического института. Машиностроение. — 2001. — № 63. — С. 79–82.
16. Носко, С. В. Исследования гидродинамических условий входа в каналах технологического оборудования [Текст] / С. В. Носко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2014. — № 3/7(69). — С. 49–54. doi:10.15587/1729-4061.2014.24876

РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ГІДРОДИНАМІКА НЕСТАБІЛІЗОВАНОЇ ТЕЧІЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ СЕРЕДОВИЩ В РОБОЧИХ КАНАЛАХ ФОРМУЮЧОГО ОБЛАДНАННЯ

Розглянуті питання, пов'язані з реологічною поведінкою ступеневих середовищ в каналах формуючого обладнання. В результаті обробки даних реометричних досліджень отримано значення параметрів реологічного рівняння та встановлено їх залежність від гідромеханічних і температурних режимів перероблюємих середовищ. Показано, що довжина ділянки гідродинамічної стабілізації потоку залежить від реологічних властивостей середовищ і умов входу в робочі канали формуючого обладнання.

Ключові слова: реологічні властивості, нестабілізована течія, канали змінної геометрії.

Носко Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной гидроаэромеханики и механотроники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: noskov@ukr.net.

Носко Сергій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Nosko Sergey, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: noskov@ukr.net

УДК 621.9.15

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44396

**Васильев А. В.,
Попов С. В.,
Даценко В. Д.**

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ВІДРІЗНОГО РІЗЦЯ З ДИСКОВОЇ ПИЛИ

Запропонована конструкція відрізного різця з дискової пили, яка вийшла з ладу та не придатна для подальшої експлуатації. Наведена конструкція є найбільш економічно доцільною у якості відрізного різця з швидкорізальної сталі Р6М5. Розглянуто вплив ступеня загострення різальної кромки на стійкість відрізного різця і запропоновано спосіб заокруглення різальної кромки, який забезпечує необхідну стійкість різця.

Ключові слова: відрізання заготовок, відрізний різець, дисковий різець, дискова пила.

1. Вступ

Продуктивність технологічних процесів виготовлення деталей машин в одичному і дрібносерійному виробництві в значній мірі залежить від стійкості різальних інструментів. При великій кількості номенклатури деталей, які встановлюються в токарний верстат, збільшується імовірність виконання відрізних операцій, і, відповідно, збільшується імовірність руйнування відрізних різців з твердого сплаву через динамічні поштовхи

або велике радіальне биття ексцентрично встановлених деталей. Використання у якості матеріалу різальної часті швидкорізальної сталі суттєво зменшує ризик крихкого руйнування, тим більш, велика кількість переточувань дозволяє створити передумови здешевлення собівартості виготовлення деталей машин.

Технологічний процес відрізання заготовок є поширеною операцією як в заготовчому виробництві, так і в технологічних процесах виготовлення деталей машин [1]. Відрізні інструменти працюють в особливо