

УДК 621.992.7.07

В. А. Тимирязев, д.т.н., проф., МГТУ «СТАНКИН», **М. З. Хостиков**, д.т.н., проф., **Т. А. Чернова**, к.т.н., доц., **В. Н. Агеева**, к.т.н., доц., РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина

E-mail: com@gubkin.ru

Инженерия поверхностного слоя материала деталей машин

Исследованы вопросы инженерии поверхностного слоя материала деталей машин и качество поверхностного слоя, приобретаемое в результате механической обработки деталей пластическим деформированием. Экспериментально установлены характер, распределение и глубина деформированного слоя, получаемые при обработке накатыванием резьбовой поверхности. Исследованы микротвердость и микроструктура поверхностного слоя материалов резьб, накатанных на различных конструкционных материалах. Установлена целесообразность применения накатывания резьб, как наиболее производительного способа обработки, обеспечивающего улучшение качества резьб по точности и шероховатости поверхности, увеличение прочности резьбовых соединений, улучшение физико-механических свойств материалов изделий и, в ряде случаев, устранение необходимости проведения последующей термообработки изделий.

Ключевые слова: инженерия поверхностного слоя материала, качество поверхностного слоя, микротвердость обработанной поверхности, микроструктура обработанной поверхности, накатывание резьб.

Работоспособность, надежность и долговечность деталей машин в значительной степени зависят от результатов творческой технологической деятельности, направленной на формирование качества поверхностного слоя материала деталей машин в процессе их изготовления. Качество поверхностного слоя характеризуется макро- и микронеровностями (шероховатостью), макро- и микроструктурой, величиной и знаком остаточных напряжений, а также физическими параметрами, связанными с искажением кристаллической решетки, плотностью дислокаций и др. Инженерия поверхностного слоя материала деталей машин непосредственно связана со способами и режимами их изготовления.

Широкому распространению способов обработки пластическим деформированием одних из наиболее сложных поверхностей – поверхностей с резьбой способствовало обеспечиваемое этими способами значительное улучшение качества изготавливаемых деталей при высокой производительности процессов. Экспериментальные данные и производственный опыт свидетельствуют о том, что шероховатость поверхности резьбы, обработанной, например, резьбонакатными головками, находится в пределах $Ra=0,63-0,08$ мкм по ГОСТ 2789–73, точность резьбы достигает четвертой степени по ГОСТ 16093–2004. Такое

качество поверхности резьбы может быть получено еще только шлифованием.

Значительно увеличивается прочность на разрыв накатанных резьбовых деталей в сравнении с нарезанными. Разрушающая нагрузка при испытаниях на разрыв повышается на 20–30%. Циклическая прочность накатанных деталей увеличивается в 1,5 раза.

Микротвердость резьбовой поверхности, полученной накатыванием, повышается по сравнению с исходной за счет возникновения наклепа на 15...25%, при этом профиль резьбы приобретает более мелкую зернистость. Увеличенная поверхностная твердость накатанных деталей обуславливает высокую износостойкость резьбовых соединений, а высокое качество поверхности – повышение ее антикоррозийных свойств, что особенно важно для ряда деталей специальных областей техники. Кроме того, обработка накатыванием ряда труднообрабатываемых материалов, например, таких, как коррозионностойкие стали и сплавы (нержавеющие, жаростойкие, окалиностойкие, кислотоупорные, жаропрочные), титан и его сплавы, никелевые и никелехромовые сплавы (типов хастеллой, инконель, нимоник, инколой, монель, инвар) и др. выполняется гораздо проще, чем обработка резанием.

Многие материалы, предназначенные для изготовления резьбовых деталей, весьма дороги. Поэтому при их обработке коэффициент использования металла должен быть максимальным. В этом отношении накатывание резьбы обладает неоспоримыми преимуществами перед нарезанием и шлифованием. Экономия металла по сравнению с нарезанием в зависимости от диаметра и шага накатываемой резьбы составляет 20–30%.

Формирование резьбовой поверхности при накатывании обеспечивается создаваемым накатывающими роликами объемным (пространственным) напряженным состоянием материала заготовки, когда все три главных напряжения в единице объема отличны от нуля $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (МПа). Для объемного напряженного состояния деформации в направлении главных напряжений $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, которые также называются главными деформациями, могут быть рассчитаны согласно обобщенного закона Гука по матричной формуле:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{E} \begin{vmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{vmatrix} - \frac{\nu}{E} \begin{vmatrix} (\sigma_2 + \sigma_3) \\ (\sigma_3 + \sigma_1) \\ (\sigma_1 + \sigma_2) \end{vmatrix},$$

где E – модуль упругости материала заготовки, МПа;

ν – коэффициент Пуассона.

При этом относительное изменение объема составляет:

$$V = (1 - 2\nu) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / E.$$

Одним из показателей качества резьбы, изготовленной накатыванием, является глубина и степень наклепа поверхностного деформированного слоя. Поверхностный слой накатанных изделий сохраняет остаточные напряжения различных величин и знаков. Наиболее распространенные методы определения глубины и степени наклепа – рентгенографическое исследование и определение микротвердости по косому срезу.

При использовании метода косых срезов на испытуемом образце с помощью специального приспособления делается срез под небольшим углом ($0,5-2^\circ$) и по косому срезу на равных расстояниях ($0,05-0,1\text{мм}$) измеряется микротвердость на твердомере. В результате получается диаграмма, у которой по оси ординат отложена твердость, а по оси абсцисс – расстояние от поверхности вглубь образца. Наклеп кончается там, где кривая на диаграмме переходит в горизонталь. Несмотря на свою простоту, метод косых срезов достаточно трудоемок при исследовании деформированных слоев, имеющих неодинаковую глубину и степень наклепа. К тому же форма резьбовой поверхности не позволяет использовать эффект косых срезов.

В настоящей работе характер распределения глубины и степени наклепа деформированного слоя по профилю резьбы, накатанной на деталях из разнообразных конструкционных материалов, определялся путем измерения микротвердости.

Резьба накатывалась серийной универсальной резьбонакатной головкой типа ВНГН-3. Резьба метрическая $M12 \times 1,75$ мм накатывалась самозатягиванием за один проход при скорости порядка 30 м/мин. От заготовок с накатанной резьбой отрезались образцы для изготовления микрошлифов механическим полированием – по 3 образца для каждого исследуемого материала резьбового изделия. Для удаления поверхностного слоя образца, получившего наклеп при шлифовании и полировании, применялось травление.

Микротвердость накатанной резьбы измерялась в четырех направлениях (рис. 1): I–I и II–II – соответственно от вершины и впадины профиля резьбы к оси изделия; III–III и IV–IV – перпендикулярно боковой стороне профиля резьбы.

Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием в исследуемый материал алмазного наконечника с квадратным основанием – алмазной пирамиды при нагрузке 0,98 Н и определением линейной величины диагонали полученного отпечатка. Точность измерений составляла $\pm 2\%$. Число твердости Н определялось как частное от деления нагрузки Р на боковую поверхность отпечатка в предположении, что углы отпечатка соответствуют углам пирамиды: $H = P/S$. Просмотр структуры исследуемых образцов микрошлифов осуществлялся с помощью микроскопа микротвердомера в темном фоне.

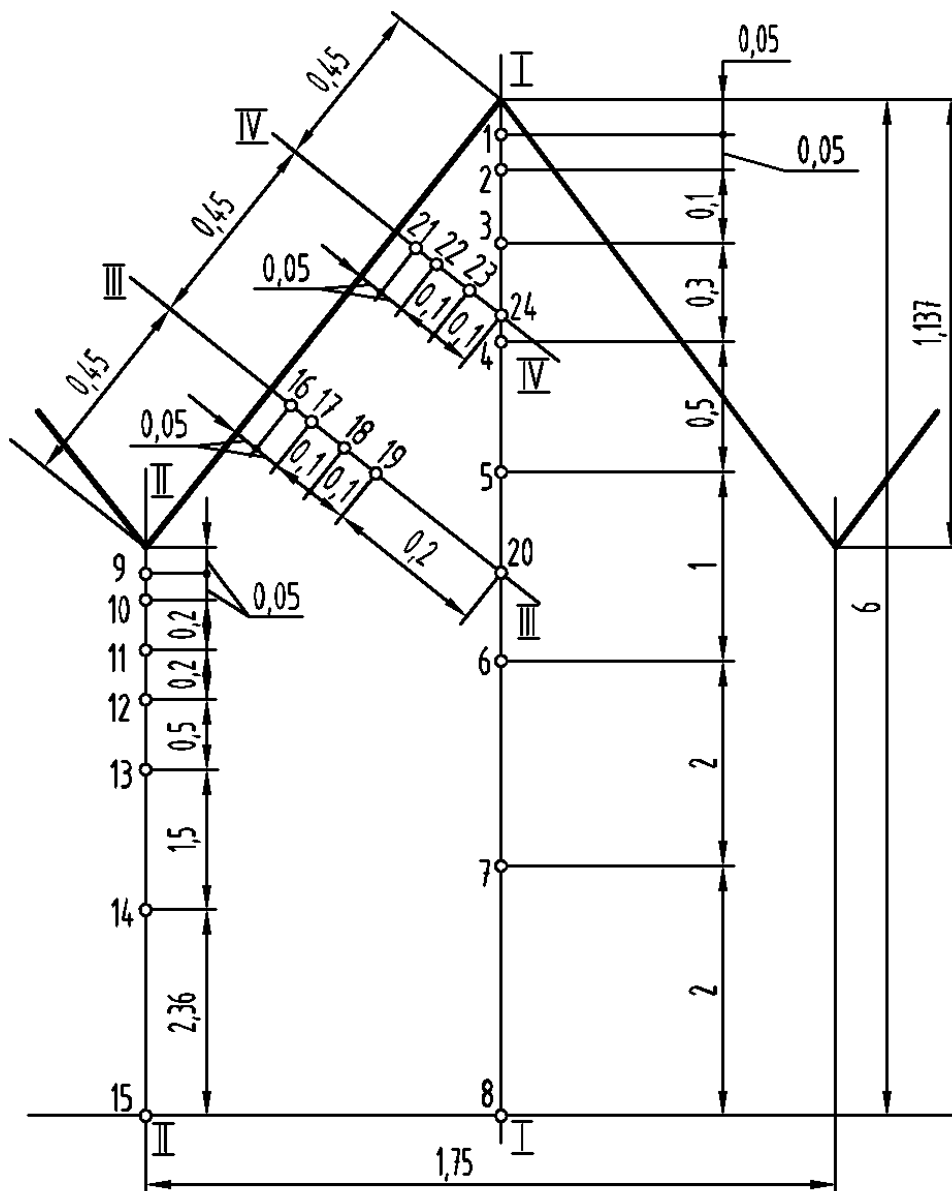


Рис. 1. Схема измерения микротвердости по сечению профиля резьбы M12×1,75мм

В таблице приведены результаты измерений микротвердости образцов с резьбой, накатанной на различных конструкционных материалах, выраженные в числах твердости по Роквеллу (ГОСТ 9013–59, ИСО 6508–86). Величины микротвердости приводятся как средние значения, полученные при измерении на трех образцах каждого вида исследуемого материала.

Как видно из полученных данных (см. таблицу), на накатанной резьбовой поверхности возникает наклеп вследствие упрочнения поверхностного слоя металла в результате его пластической деформации.

Упрочнение имеет различную величину на отдельных участках резьбовой поверхности и достигает наибольших значений на участках, прилегающих ко дну впадины резьбы, наиболее подверженному пластической деформации.

Известно, что у резьбовых деталей впадина резьбы может являться очагом концентрации напряжений и местом возникновения усталостных микротрещин. Это явление особенно характерно для высоконагруженных резьбовых соединений. Образующийся на поверхности в результате накатывания наклеп, наибольшая величина которого располагается во впадине резьбы, благотворно влияет на повышение усталостной прочности резьбовых деталей.

На рис. 2 представлены микрошлифы впадин резьбы, накатанной на деталях из различных материалов.

Конструкционная сталь 45 (рис. 2, а) до накатывания резьбы, то есть в состоянии поставки, имеет структуру феррита и пластинчатого или зернистого перлита (в нашем случае сталь была с пластинчатым перлитом). После накатывания резьбы, ввиду нагартовки, начиная от впадины, наблюдается ярко выраженный упрочненный перлит, деформированный и вытянутый (темные участки). Наблюдается также увеличение твердости до 30 HRC (см. направление измерения II–II).

Титановый сплав BT5-1 (рис. 2, б) в состоянии поставки имел структуру, состоящую из сложных карбидов округлой формы. Изменений в структуре после накатывания резьбы не обнаружено. Однако ориентация карбидов в структуре изменилась – карбиды расположились веером, что свидетельствует о деформации сплава в процессе накатывания.

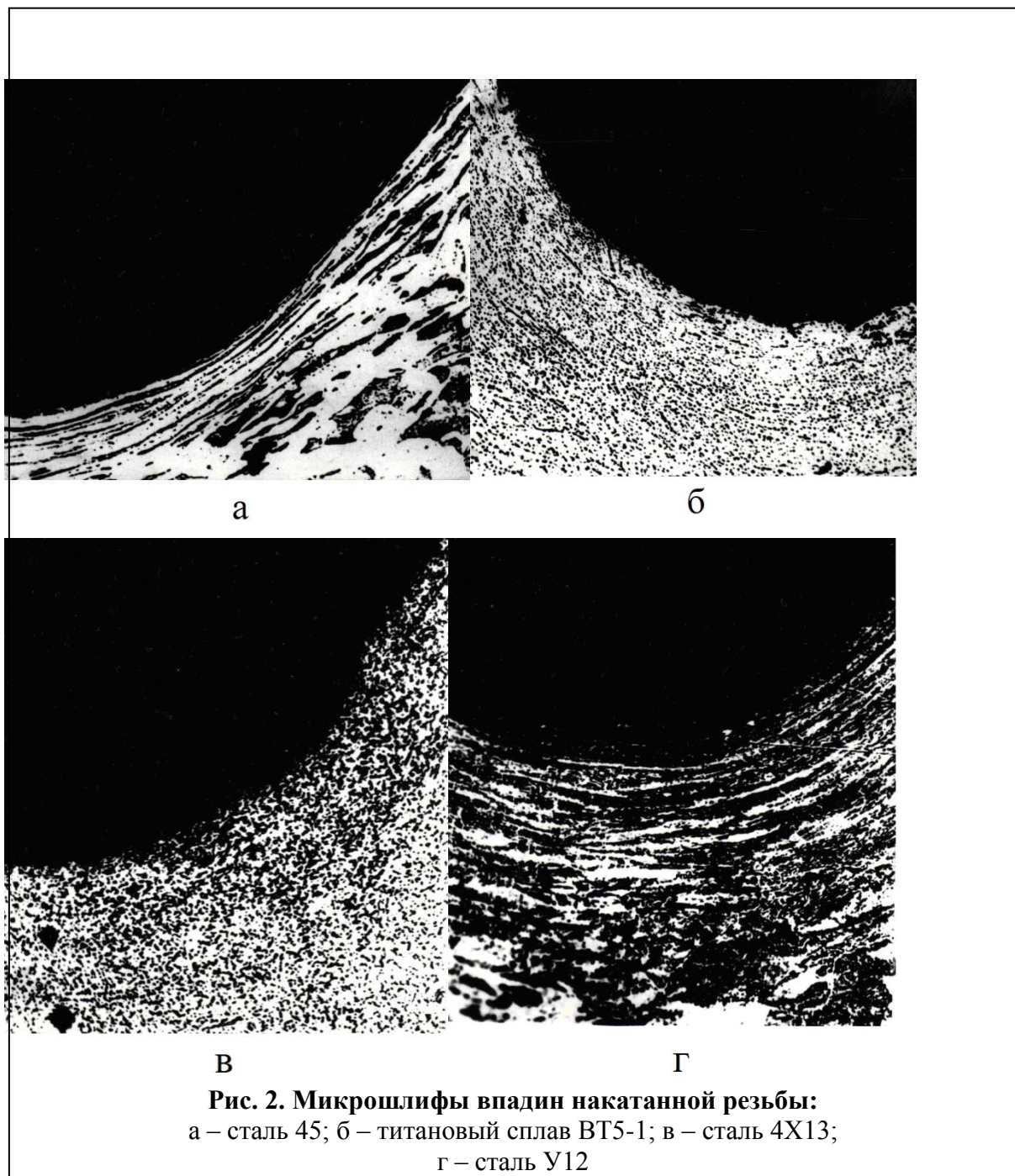
Таблица

Микротвердость образцов с резьбой, накатанной на различных конструкционных материалах

Направление измерений микротвердости	№№ точек	Сталь конструкционная			Сталь коррозионностойкая				Титан и его сплавы		
		10	45	40X	2X13	4X13	9X18	X18H9T	BT1-1	BT5-1	BT6
		Микротвердость HRC _{cp}									
I-I	1	23	26	41	32,5	27	36	34,5	25	32,5	35
	2	13	28,5	41	30	32,5	36	36	23,5	32,5	38,5
	3	20	25	41	30	30	36	37,5	23,5	31,5	36,5
	4	18	25	39,5	28,5	30	34,5	37,5	26	33,5	36,5
	5	15	22	36,5	25	28,5	32,5	35	22	33,5	36
	6	14	17	36	19	25	28	37,5	18	33,5	38,5
	7	17	15	37,5	22	29	36,5	36,5	20	32,5	38,5
	8	15	14	35	21,5	28	34,5	38,5	21,5	38,5	36
II-II	9	23	30	44	34,5	39,5	42	42	25	35	40,5
	10	23,5	25	44	28,5	34,5	38,5	39,5	22	33,5	38,5
	11	17	20,5	36,5	25	28,5	29	36,5	21,5	33,5	40,5
	12	12	19	35	20,5	30	30	36	20	33,5	37,5
	13	8	16	37,5	23,5	28	30	32,5	19	32,5	35
	14	18	17	35	20	24	36	35	17	31,5	37,5
	15	16	12	39,5	19	24	33,5	36,5	20	34,5	37,5
III-III	16	19	27	41	31,5	32,5	37,5	42	20,5	33,5	38,5
	17	18	23,5	39,5	28	33,5	36	40	22	34,5	36,5
	18	13	23	37,5	25	29	33,5	38,5	20,5	34,5	35
	19	14	21,5	40	27	28,5	28,5	38,5	16	32,5	37,5
	20	15	20,5	37,5	24	32,5	32,5	36	17	31,5	35
IV-IV	21	21,5	23	42	30	29	36	38,5	18	32,5	36,5
	22	20	28	40,5	31,5	32,5	36,5	39,5	20,5	32,5	34,5
	23	17	23,5	40	28	31,5	38,5	38,5	18	33,5	36
	24	16	22	40,5	26	30	37,5	37,5	20,5	34,5	34,5

Продолжение таблицы

Направление измерений микротвердости	№№ точек	Сталь инструментальная					Цветные сплавы		
		У8	У12	ХВГ	Р18	ШХ15	АД1	ЛС59-1	Л62
		Микротвердость HRC_{cp}							
I-I	1	33,5	40	37,5	36,5	35	6	7	15
	2	31,5	35	36	37,5	32,5	6	6	13
	3	30	35	36	39,5	28,5	6	15	15
	4	27	36,5	36,5	38,5	29	6	15	15
	5	24	33,5	34,5	33,5	24	6	6	10
	6	20,5	36	33,5	29	13	6	6	6
	7	13	39,5	26	26	20	6	6	6
	8	19	36	30	24	20,5	6	6	6
II-II	9	37,5	45	42	42	44	6	21	20
	10	33,5	41	40	40,5	40,5	6	16	18
	11	26	36	29	28	28	6	6	9
	12	22	39,5	28,5	25	25	6	6	6
	13	20,5	40,5	26	18	18	6	6	6
	14	28	34,5	25	19	19	6	6	6
	15	17	36	23,6	16	16	6	6	6
III-III	16	31,5	40,5	37,5	39,5	34,5	6	15	16
	17	28,5	33,5	36	37,5	28,5	6	12	15
	18	29	39,5	33,5	36	32,5	6	8	10
	19	29	37,5	36	33,5	26	6	8	10
	20	26	36,5	33,5	30	29	6	8	10
IV-IV	21	32,5	39,5	40,5	36,5	36,5	6	16	15
	22	30	38,5	38,5	35	35	6	14	12
	23	28,5	36,5	36	32,5	32,5	6	10	15
	24	29	37,5	36	29	29	6	10	12



После накатывания резьбы на изделия из коррозионностойкой стали мартенситного класса 4X13 (рис. 2, в) в его структуре наблюдается ярко выраженное присутствие троостита, что является следствием деформации и повышения твердости изделия до 39,5 HRC (см. направление измерения П–П). Структура данного типа сталей до накатывания резьбы состоит из феррита, аустенита и карбидов, то есть полностью светлого фона.

Структура инструментальной стали Y12, как известно, до любой обработки состоит из карбидов железа (цементита) и феррита. Если в результате термической обработки данной стали получаем структуру мартенсита (темные иглы) и карбидов, то после накатывания резьбы

(рис. 2, г) помимо феррита и карбидов в структуре материала появляется еще и троостит.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о благоприятном действии процесса накатывания резьбы, то есть об увеличении поверхностной твердости за счет деформации. При этом упрочнение распространяется на значительно большую глубину, чем видимая под микроскопом зона деформации кристаллитов.

Проведенные исследования качества поверхностного слоя, микротвердости и микроструктуры резьбы, образованной накатыванием на различных конструкционных материалах, позволяют сделать следующие выводы:

1. Глубина деформированного слоя металла по профилю накатанной резьбы распределяется неравномерно и достигает наибольших значений на участках, прилегающих ко дну впадины резьбы.

2. Микротвердость накатанной резьбы уменьшается, начиная от поверхности резьбы и постепенно достигая своего исходного значения за пределами ее профиля.

3. Алюминиевые сплавы, исследованные на образцах из материала АД1, практически не меняют своей твердости после накатывания резьбы неглубокого профиля, то есть они не подвергаются поверхностному упрочнению.

4. Полученные данные подтверждают целесообразность применения накатывания резьбы, как наиболее производительного способа обработки, который обеспечивает улучшение качества резьбы по точности и шероховатости поверхности, увеличение прочности резьбовых соединений, улучшение физико-механических свойств металла изделия и, в ряде случаев, устранение необходимости проведения последующей термообработки изделий.

Список литературы

1. **Тимирязев В.А., Вороненко В.П., Схиртладзе А.Г.** Основы технологии машиностроительного производства. Под общей ред. В.А. Тимирязева. – С-Пб.: «Лань». – 2012. – 448 с.

2. **Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Лукина С.В., Соломенцев Ю.М., Схиртладзе А.Г., Власов В.И.** Процессы и операции формообразования и инструментальная техника. – М.: «Янус-К». – 2006. – 280 с.

3. **Схиртладзе А.Г.** Технологические процессы в машиностроении. – М.: «Высшая школа». – 2007. – 928 с.

4. **Тимирязев В.А., Хазанова О.В., Гайлит Ю.Т.** Программные методы управления точностью обработки на многоцелевых станках. «Вестник машиностроения». – 2005 – №9. – С. 14 – 17.

5. **Тимирязев В.А., Хостиков М.З.** Автоматическая оценка состояния режущего инструмента на многоцелевых станках. Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – № 1(11). – С. 198–202.

6. **Хостиков М.З., Тимирязев В.А., Чертов Ф.Н.** Технология накатывания резьб большой длины. Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – № 2(12). – С. 177–180.

7. **Локтев А.Д., Гуцин И.Ф., Хостиков М.З. и др.** Общемашиностроительные нормативы режимов резания. / Справочник. – М.: «Машиностроение». – 1991. Т. 1 – 640 с. Т. 2 – 304 с.