

ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННОГО И НЕУПРОЧНЕННОГО ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Трахтенберг Б.Ф., Тарасов А.В., Скуратов Д.Л.

Самарская государственная экономическая академия, г. Самара
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Стойкость режущего инструмента во многом предопределяет технико-экономическую эффективность механической обработки. Поэтому проблема повышения стойкости лезвийного инструмента является весьма актуальной и широко обсуждаемой в машиностроении. Известно большое количество технических и технологических решений, направленных на повышение стойкости, однако они не могут считаться универсальными, хотя и формируют некоторые общие тенденции, так как свойства инструментальных материалов не являются закрепленными характеристиками.

Исходя из выше изложенного, необходимая достоверность при оценке стойкости лезвийного инструмента может быть достигнута только при проведении натурных испытаний в производственных условиях. Высокая трудоемкость и длительность подобных методов в сочетании со значительной их металлоемкостью и стоимостью предопределяют важность минимизации объема выборки при сохранении ее репрезентативности.

При закреплении ряда характерных параметров процесса, а именно: материалов и геометрических параметров обрабатываемых заготовок и инструмента, режимов резания, особенностей охлаждения зоны резания и др., достоверные сравнительные результаты в выделенной области могут быть получены с привлечением достаточно корректно обоснованных имитационных способов и, в частности, квазианалоговых методов испытаний [1]. При этом следует иметь в виду, что результаты испытания стойкости режущего инструмента в производственных условиях могут отличаться в 6...12 раз [2-3], а реализуемые в эксперименте новые или усовершенствованные технологические способы и режимы упрочнения обеспечивают зачастую повышение стойкости инструмента в 1,2 – 1,8 раза.

При реализации экспериментальных программ рассматриваемого плана зачастую приходится сталкиваться с достаточно сложной задачей - как достигнуть необходимую достоверность, полученных в эксперименте результатов, при минимальных затратах? С одной стороны, чем больше объем выборки, тем достовернее результаты исследований, с другой – тем выше суммарные затраты на выполнение исследований. Возможные пути решения подобных задач осуществляются с применением методологии планируемого эксперимента и привлечением к обработке результатов

статистических методов, вместо метода проб и ошибок. В конечном итоге метод проб и ошибок приводит к получению определенного количества дискретных результатов, которые относятся к строго закрепленному сочетанию варьируемых параметров системы. Из их числа можно выбрать наиболее приемлемый результат. Однако стоит изменить хотя бы один из варьируемых параметров, чтобы итоговой вывод стал снова неопределенным. Нахождение наилучшего результата в этом случае связано с необходимостью реализации уже другой экспериментальной программы [4].

При решении вопроса о допустимости использования статистических методов никогда не следует упускать из вида, что они применимы только для анализа систем со случайными отклонениями. Систематические погрешности, возникающие в системе, должны быть из анализа исключены. Это может быть реализовано по одному из трех сценариев:

- за счет исключения систематических ошибок в эксперименте априори (что представляет значительные трудности, а зачастую вообще невозможно);

- путем закрепления на неизменном уровне погрешности от систематических отклонений во всех опытах в масштабе всей экспериментальной программы;

- путем трансляции систематических погрешностей (в тех случаях, когда это возможно) в случайные.

Выбор сценария, естественно, зависит от конкретных особенностей экспериментальных систем и реализуемых программ.

К числу наиболее распространенных систематических погрешностей следует отнести: металлургическую наследственность инструментального материала, схему и параметры термомеханической обработки материала от исходной заготовки до выхода на соответствующий (требуемый) сортамент, схему и параметры объемной термической и поверхностной упрочняющей обработки инструмента, уровень жесткости системы СПИД и технологические параметры физико-механической обработки.

Из числа перечисленных факторов, влияющих на стойкость лезвийного инструмента, рассмотрим несколько подробнее вопросы, связанные с жесткостью системы СПИД и режимами резания.

Формирование систематических погрешностей во многом обусловлено конструктивными особенностями станка, массой и жесткостью его составляющих и скоростью перемещения подвижных элементов, которые в совокупности определяют частоту и амплитуду вибраций системы, а также возможное биение режущего инструмента. Износ в процессе эксплуатации трущихся поверхностей станка, завышение скорости перемещения исполнительных органов, связанное с тенденцией к повышению

производительности обработки, также транслируют систематические погрешности обсуждаемой группы в случайные. Большая группа факторов, возникающих в эксплуатационных условиях, изначально формирует случайные погрешности. В их числе: нежесткое и эксцентричное закрепление инструмента, использование заготовок с искривленной осью и их эксцентричное закрепление, применение лезвийного инструмента с повышенной склонностью к хрупкому разрушению (микрорывкрашивание режущих кромок приводит к появлению вибрационного эффекта).

Технологические параметры (режимы резания) с первого взгляда представляются как источники формирования систематических погрешностей. Этот вывод однако справедлив только в «рафинированных» условиях обработки, когда свойства инструментального материала и геометрические параметры режущего инструмента являются неизменными. Вместе с тем известно, что нормируемое для конкретного инструмента значение твердости может быть получено при различных схемах и параметрах упрочняющей обработки инструмента. При этом структура инструментального материала и ряд некоторых неконтролируемых свойств оказываются столь заметно различными, что существенно сказываются на обрабатываемости, а следовательно, и стойкости инструмента.

В реальных, а не «рафинированных» условиях обработки режимы резания становятся критичными к самим условиям контрольных испытаний, то есть закрепление режимов резания не гарантирует формирования в этих условиях систематических погрешностей. В реальных условиях эта категория погрешностей также носит случайный характер. Другой важный вывод состоит в том, что справочная информация по выбору режимов резания [3,5] должна рассматриваться как ориентировочная. Для каждого конкретного случая механической обработки заготовок существуют свои рациональные условия.

Таким образом, вопрос оценки категорий ошибок (случайная или систематическая) нельзя считать рецептурным. При низкой технологической культуре производственных процессов весь спектр формирующихся погрешностей заметно смещается в поле случайных ошибок. Отсюда учет и отсеивание факторов, обуславливающих формирование систематических погрешностей, приобретает важное значение для возможности достоверного использования статистических методов оценки надежности инструмента, равно как и объектов другой номенклатуры.

Стойкость инструмента в значительной мере определяется теплоустойчивостью (красностойкостью) инструментального материала, из которого он изготовлен, и условиями применения. Несколько характерных иллюстраций к сказанному приведено в табл.1.

Таблица 1 - Сравнительная информация о зависимости стойкости режущего инструмента от условий конечного встречного фрезерования уступов

Материалы: сверху – инстр. матер.; внизу – матер. обработ. заготовки	Диаметр концевой фрезы, мм; число зубьев	Вариант термической обработки	Режимы резания	Длина (толщина) обрабатываемой заготовки, мм	Относительная стойкость
P9K5 12X13	Ø 14; Z = 6	типовая	V = 22 м/мин; S _{мин} = 63 мм/мин; t = 5 мм; без охлаждения	67 (5)	1,00
		экспериментальная			1,70
то же	то же	типовая	то же	235 (5)	0,30
		экспериментальная			0,55
P9K5 30XГСА	Ø 16; Z = 6	типовая	V = 28 м/мин; S _{мин} = 100мм/мин; t = 2 мм; с охлаждением	400 (20)	1,00
		экспериментальная			1,57
то же	то же	типовая	То же, без охлаждения	то же	0,13
		экспериментальная			0,20
то же	то же	типовая	V = 20 м/мин; S _{мин} = 80 мм/мин; t = 2 мм; без охлаждения	то же	0,33
		экспериментальная			0,50

Из приведенных данных видно:

- уровень относительной стойкости фрез для различных вариантов обработки (по скорости резания, особенностям охлаждения и длительности контактного взаимодействия) изменяется в 3-8 раз;
- при прочих равных условиях стойкость фрез при работе без охлаждения снижается, примерно, в 7 раз;
- при повышении скорости фрезерования на 40%, в случае работы без охлаждения, стойкость фрез снижается, примерно, в 2,5 раза;
- существенное влияние на стойкость инструмента оказывает продолжительность контактного взаимодействия. Например, при увеличении длительности обработки за проход в 3,5 раза (в случае работы без охлаждения) снижение стойкости фрез составило около 3 раз.

Проведение сравнительных испытаний опытного инструмента при форсированных режимах затрудняет ранжирование влияния технологи-

ческих параметров на стойкость инструмента. Однако даже в столь неблагоприятных условиях сохраняется возможность сравнения стойкости режущего инструмента, термически обработанного по типовому или экспериментальному варианту, в пределах партий существенно различающихся по интенсивности нагружения.

Таким образом, достоверность оценки результатов сравнительных испытаний для различных серий режущего инструмента, различающихся по технологическим схемам и режимам упрочнения, существенно искажается формированием в реальных эксплуатационных условиях целого спектра случайных погрешностей. Исходя из вышеизложенного, необходимо реализовать ряд мер для повышения достоверности оценки сравнительной стойкости режущего инструмента. Соответственно может быть сформулировано несколько требований, направленных на решение этой задачи.

1. В каждой конкретной серии испытаний необходимо принять меры к предельному уменьшению пакета случайных погрешностей, исключая возможность трансляции систематических погрешностей в случайные. Это предопределяет необходимость поплавочного запуска инструментальной стали и обрабатываемого материала в технологическую обработку и проведения испытаний на закрепленном станке или равными партиями на группе закрепленных станков. При невозможности идентификации плавки инструментальной стали в эксперименте, задача однородности выборки на каждый вариант может быть решена путем равномерной шихтовки вариантов из нормированного наперед заданного набора прутков.

2. По возможности уменьшить появление случайных погрешностей, а также снизить уровень их влияния на конечные результаты по долговечности инструмента. Технологические и технические аспекты этого направления рассмотрены при предшествующем анализе [4].

3. Учитывая значительное влияние случайных погрешностей на уровень стойкости режущего инструмента, самостоятельное и важное значение приобретает вся совокупность вопросов, связанных с повышением достоверности оценки стойкости лезвийного инструмента методами статистического анализа. С учетом дефицитности и высокой стоимости инструмента принципиальное значение имеет назначение предельно экономичной выборки с гарантированным выходом на наперед заданную надежность оценки.

Получение достоверной статистической оценки в границах экспериментального пространства предусматривает решение поставленной задачи в два этапа:

- определение объема выборки n (потребное количество инструмента для экспертных испытаний) достаточного для оценки генерального среднего значения показателя \bar{x} (средняя стойкость инструмента) с наперед заданной надежностью γ при принятой ошибке оценки стойкости;

- проверка гипотезы о значимости увеличения выборочного среднего значения показателя \bar{x}_* при реализации нового (или совершенствовании типового) технологического процесса изготовления инструмента по сравнению с его базовым (в рассматриваемом случае – для типовой технологии упрочняющей обработки) значением \bar{x}_0 при заданном γ (с учетом установленной из эксперимента устойчивости значений показателя x_i).

Из ранее отмеченного следует: формирование параметров качества режущего инструмента носит стохастический характер. Соответственно поставленную задачу необходимо решать методами математической статистики [5]. В указанной постановке задача рассмотрена в работе [6]. Решение получено в виде:

$$n = \left[u_{кр}^2 \frac{\sigma^2}{(\bar{x}_* - \bar{x}_0)^2} + 1 \right] \quad (1) \quad \text{или} \quad n = \left[u_{кр}^2 \frac{W^2}{\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)^2} + 1 \right], \quad (2)$$

где: $\lambda = \frac{\bar{x}_*}{\bar{x}_0}$ относительное превышение среднего значения стойкости режущего инструмента, упрочненного по новой технологии, против типовой схемы упрочнения;

$u_{кр}$ - критическое значение критерия, вычисленное с помощью таблиц функций Лапласа из соотношения $\Phi(u_{кр}) = \gamma - 0,5$;

σ^2 - значение дисперсии;

W - коэффициент вариации значений показателя стойкости (относительная величина среднеквадратичной ошибки на единицу стойкости инструмента, %).

Используя выражение (2), определим минимально необходимый объем выборки при варьировании W в интервале от 0,22 до 0,40, λ в интервале от 1,05 до 1,55 при $\gamma = 0,95$ и представим полученные результаты таблично (табл. 2) и графически (рис. 1).

Таблица 2 - Зависимость минимально необходимого объема выборки от численных значений λ и W при $\gamma = 0,95$

λ	Объем выборки n			
	$W = 0,22$	$W = 0,28$	$W = 0,34$	$W = 0,40$
1,05	57,30	92,80	136,90	189,30
1,10	15,90	25,70	37,90	51,80
1,15	7,70	12,50	18,50	25,60
1,20	4,80	7,70	11,30	15,70
1,25	3,30	5,30	7,90	10,90
1,30	2,50	5,00	5,90	8,20
1,35	2,00	3,20	4,70	6,50
1,40	1,60	2,60	3,80	5,30
1,45	1,30	2,20	3,30	4,50
1,50	1,20	1,90	2,80	3,90
1,55	1,10	1,70	2,50	3,50

Из анализа приведенных данных следует, что снижение устойчивости (стабильности) результатов по стойкости (увеличение численного значения W) заметно (в 2,5-3,3 раза) сказывается на увеличении минимального потребного количества экспертных испытаний инструмента (определяется численным значением n). При оценке достоверности результатов стойкостных испытаний важное значение имеет не только средняя стойкость инструмента, но и устойчивость значений (учитывает рассеяние результатов в пределах между их максимальным и минимальным значением). В тех случаях, когда устойчивость показателя стойкости задана не коэффициентом вариации W , а размахом $R = (x^{\max} - x^{\min})$, рассеяние результатов по стойкости можно представить в виде:

$$\xi = \frac{x^{\max} - x^{\min}}{\bar{x}_0} = \frac{R}{\bar{x}_0}. \quad (3)$$

В этом случае для перехода к W можно воспользоваться соотношением:

$$\frac{R}{\sigma} = \alpha_n, \quad (4)$$

где α_n табличное значение [7].

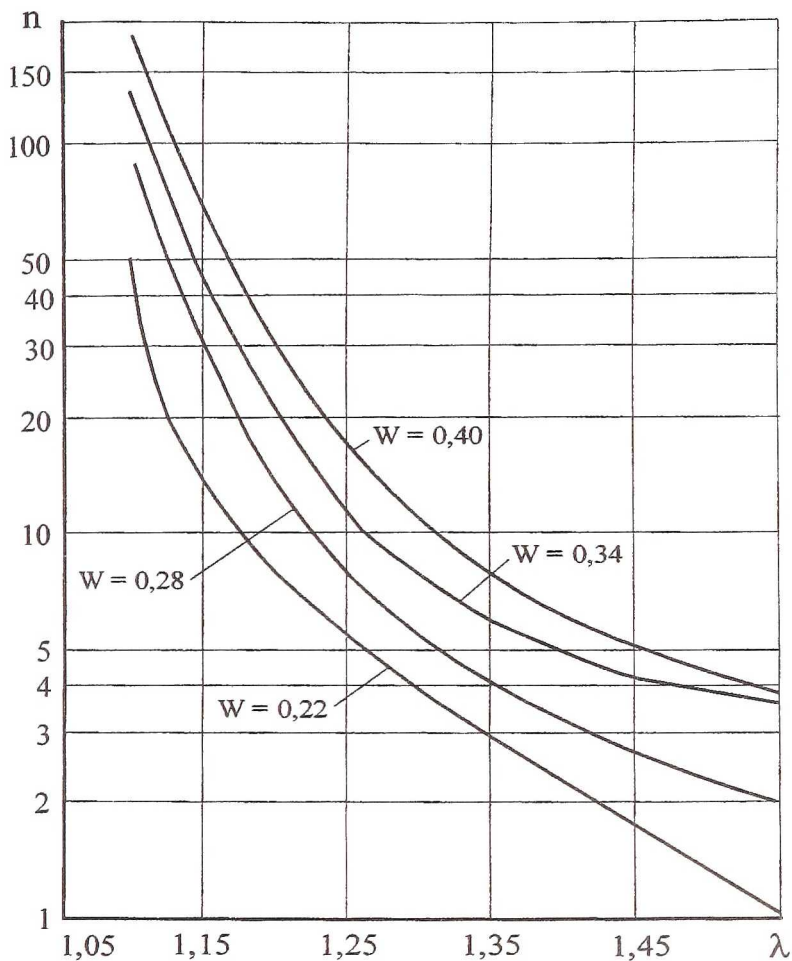


Рис. 1. Зависимость объема достоверной выборки n от относительного повышения стойкости инструмента λ при различных закрепленных значениях коэффициента вариации значений показателя стойкости W и значений надежности $\gamma = 0,95$

Тогда разделив числитель и знаменатель (4) на \bar{x}_0 , получим:

$$\frac{\xi}{W} = \alpha_n. \quad (5)$$

На минимально достаточный объем выборки n существенное влияние оказывает не только разброс, но и численное значение γ (табл. 3).

Таблица 3 - Зависимость минимально необходимого объема выборки при варьировании λ , W и численного значения надежности γ

Задано		Вычисленное значение n при	
γ	W	$\lambda = 1,05$	$\lambda = 1,55$
0,90	0,40	114,00	2,10
	0,22	34,50	0,60
0,95	0,40	189,30	3,50
	0,22	57,30	0,90
0,97	0,40	245,90	4,50
	0,22	74,40	1,40

Из приведенных оценок видно, что при закрепленных значениях W и λ при снижении надежности с 0,97 до 0,90 минимально достаточный объем выборки n заметно уменьшается – примерно в 2,15 раза при различных значениях λ и W , то есть имеет место заметное уменьшение необходимого количества экспериментов. Соответственно, экономичность экспериментальных программ по оценке стойкости режущего инструмента во многом предопределена обоснованностью выбора надежности (по численному значению γ).

Из сказанного можно сделать следующие важные для практики выводы:

- для одноинструментальных наладок следует руководствоваться меньшими значениями γ (так как отдельные выпадения по стойкости инструмента не являются критически важными в эксплуатационных условиях);

для многоинструментальных наладок, в которых устойчивости результатов по стойкости инструмента придается даже большее значение, чем средней стойкости, следует опираться на повышенные значения γ .

Таким образом, алгоритм решения поставленной задачи – задачи повышения достоверности оценки стойкости лезвийного инструмента – сводится к следующим процедурам:

- исключение (или закрепление на неизменном уровне) систематических погрешностей при испытании стойкости инструмента;
- исключение (или технически возможное уменьшение) случайных погрешностей;

использование систематически накапливаемой информации по стойкости инструмента и устойчивости значений этого показателя при традиционных способах упрочнения, а также ориентировочных прогнозов по повышению λ при заданной надежности γ для решения вопросов об

обоснованном выборе n при проведении эксплуатационных испытаний стойкости инструмента, упрочненного по новой технологии;

- использование полученных в эксперименте результатов по \bar{x}_* .

для уточнения значений W (или ξ) и λ при определении нового значения n в условиях выполнения систематических исследовательских программ по достоверной оценке стойкости лезвийного инструмента при реализации новой технологии его термического упрочнения.

Заключительный вопрос связан с решением двуединой задачи – с одной стороны, достижение технологически обоснованной надежности при статистической оценке стойкости режущего инструмента, с другой стороны, обеспечение предельно возможной экономичности самой экспертизы. Естественно, что наиболее привлекательным с позиции экономичности является использование малой выборки. Однако при малых выборках естественно возникает вопрос - насколько достоверно отнесение подобной выборки к категории репрезентативной и какова надежность полученных результатов? В указанных случаях границы допустимости использования методов статистической обработки должны стать предметом специального анализа, так как привлечение статистических методов вне этих границ создает только иллюзию достоверности, в то время как сами оценочные результаты могут быть весьма далеки от достоверных.

Объем репрезентативной выборки (n), как известно, однозначно предопределен наперед заданным коэффициентом корреляции между вероятностно ожидаемым событием и его зеркальным отображением в природе. Соответственно, решающее значение имеет обоснованный выбор численного значения надежности γ . Зачастую, при методической проработке эксперимента, исследователь априори ставит перед собой задачу достижения предельно высокого значения γ (например, $\gamma = 0,97$). При этом опускается из внимания тот факт, что при переходе, например, к $\gamma = 0,95$ размер репрезентативной выборки снижается на 40%, а при $\gamma = 0,90$ - на 58% [4]. Понятно, что в этих условиях заметно улучшаются все другие оценочные характеристики эксперимента (длительность, металлоемкость, трудоемкость, стоимость...). В достаточно широких границах корреляции $n(\gamma)$ представлена на рис.2. В критических случаях, когда каждый единичный эксперимент требует значительных затрат, вопрос обоснованного выбора γ должен решаться как рутинная задача на экономическую минимизацию в системе «суммарные затраты на реализацию экспериментальной программы – возможные убытки от снижения достоверности». В других случаях, когда суммарные затраты на выполнение экспериментальных программ невелики, численное значение γ должно

выбираться минимальным, исходя из соображений технологической достаточности и экономичности решения.

Проиллюстрируем сказанное на примере оценки эффективности применения новой конструкции или новой технологии упрочняющей обработки режущего инструмента. Предположим, что удельная стоимость инструмента традиционного исполнения принята за 1, а изготовленного по новой технологии составляет 2-3,5 единицы. В последнем случае разброс по относительной стойкости инструмента значителен ($A = 1,5$ единицы). Однако повышение стойкости, достигаемое в эксперименте еще значительнее ($\delta = 2-3,5$ раза). Это позволяет ориентироваться на низкие значения γ (порядка 0,75 – 0,80, что уменьшает объем выборки против $\gamma = 0,95$ на порядок). На основании многочисленных исследований были разработаны рекомендации по определению экономически репрезентативной выборки (табл. 2, см. рис. 2).

Таблица 4 - Рекомендуемые значения γ при $A/\delta = \text{var}$

Численные значения	A/δ	> 0,8	0,7-0,8	0,5-0,7	< 0,5
		γ	0,99-0,95	0,95-0,90	0,90-0,85

При этом важно подчеркнуть, что подобный подход может быть использован, только в экологически безопасных экспериментах, а также в тех случаях, когда экономические потери от “взрывных” результатов незначительны.

По содержанию в работе рассмотрены вопросы, связанные с целевой направленностью поиска – повышением достоверности оценки стойкости лезвийного инструмента, имеющим важное значение для экономичного выполнения экспериментальных программ. Однако большинство положений, изложенных в работе, справедливо и при решении вопросов оценки значимости реально достигнутого повышения долговечности в производственных условиях.

Список литературы

1. Квазианалоговые испытания штамповых сталей / Б.Ф. Трахтенберг, И.И. Веклин, М.С. Кенис и др. // Производство и исследование быстрорежущих и штамповых сталей. М.: Металлургия, 1970. С. 98-103.
2. Ларин М.Н. Вопросы рациональной эксплуатации сверл // Спиральные сверла. М.: Минстальпром, 1966. С. 5-22.
3. Басов В.В., Берляев Б.В., Черемисин А.С. Исследование обрабатываемости автоматных сталей АС35Г2 и АС11 на Волжском автомобильном заводе // Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов: Межвуз. сб., Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1976. Вып. 3. С. 21-23.

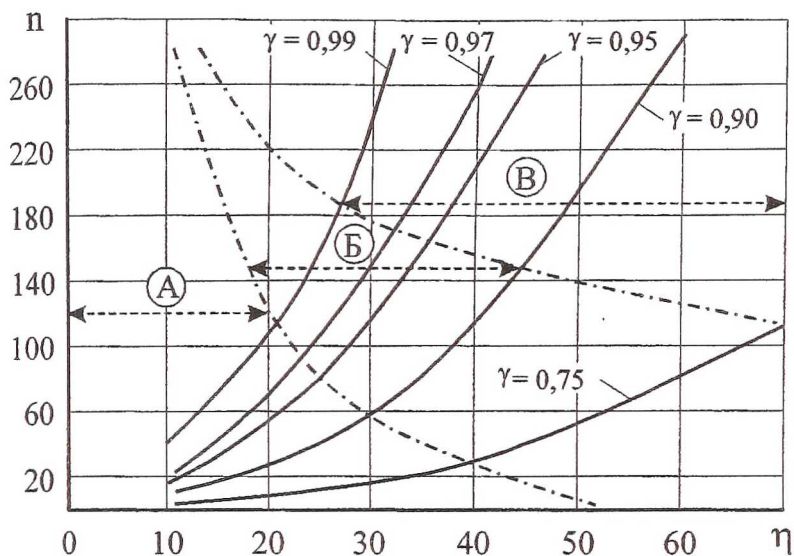


Рис. 2. Выбор экономически репрезентативной выборки с учетом основных оценочных характеристик по стойкости режущего инструмента:

$\eta = W/\lambda$ - безразмерный оценочный критерий; А - область экономических решений по выбору n ; Б - область приемлемых решений; В - область высокотратных решений

4. Методологические подходы к повышению достоверности оценки экспериментальных результатов / Б.Ф. Трахтенберг, А.В. Тарасов, Л.К. Тимофеева, Д.Л. Скуратов // Доклады междунард. научно-технич. конф. Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе. 17-18 сент. 1997 г. Самара, 1997. Ч.1. С. 184 - 191.

5. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1974. 240 с.

6. Трахтенберг Б.Ф., Сафиулин Г.Г., Тарасов А.В. Влияние систематических и случайных погрешностей на достоверность оценки стойкости лезвийного инструмента// Высокоэффективные методы механической обработки авиационных материалов: Межвуз. сб. науч. тр.; Куйбышев. авиац. ин-т. Самара, 1991. С. 44 -53.

7. Смирнов В.Н., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математическая статистика в технике. М.: Наука, 1969. 512 с.