

Неразрушающий контроль

УДК 620.179.16

© А.В. Корнилова, 2007

К ВОПРОСУ О КОМБИНИРОВАНИИ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

А.В. КОРНИЛОВА, канд. техн. наук (ЗАО «Прочность»)

Современные требования к качеству ответственных изделий машиностроения диктуют необходимость повышения надежности обнаружения браковочных дефектов на каждой стадии изготовления. Одним из предлагаемых методов повышения надежности выявления дефектности (как совокупности дефектов) представлен многократный контроль одним или (и) несколькими видами неразрушающего контроля (НК) [1, 2]. Но, как было показано в [1], интуитивные априорные понятия о полезности применения этого метода не являются строгим математическим доказательством его необходимости. Для превращения априорных представлений в апостериорные и выявления оптимального сочетания видов НК проведем вычислительный эксперимент на примере обнаружения технологической дефектности стальной отливки наружного ползуна кривошипного листоштамповочного пресса двойного действия (рис. 1).

Конечно-элементная модель создана для выявления напряжений в бездефектном состоянии в целях составления карты допустимых дефектов. Такая карта накладывается на карту обнаруженных

дефектов и с вероятностью, зависящей от надежности методов НК, принятых методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и определения механических свойств, делается вывод о возможности эксплуатации исследуемого объекта в предполагаемых режимах.

При проведении вычислительного эксперимента принимаем, что достоверность контроля различными видами НК подтверждается только объективными факторами. Субъективные ошибки, определяемые наличием субъективных (регулируемых) факторов, таких как низкая квалификация оператора, его плохое психофизическое состояние и недобросовестность, не рассматривались.

ГОСТ 19200—80 «Отливки из чугуна и стали. Термины и определения» дает характеристику всем возможным видам технологических дефектов отливок и причинам их возникновения. Примем, что дефектность отливки определяется совокупностью дефектов, присущих применяемому технологическому процессу в условиях конкретного предприятия-изготовителя. Известно, что вероятность обнаружения дефекта $P_{обн\,ji}$ (индекс j относится к виду НК, i — к виду дефекта), при прочих равных условиях, зависит от его размера $P_{обн\,ji} = f(d)$. Крупногабаритные детали проектируются с конкретными коэффициентами запаса относительно максимального математического ожидания напряжений в бездефектном состоянии. Согласно [3] коэффициент запаса прочности для стальных отливок деталей кузнечно-прессового оборудования $n = 5-10$ относительно предела текучести. Очевидно, что браковочными дефектами рассматриваемой отливки ползуна будут дефекты, лежащие в зоне оптимального действия всех видов НК. В табл. 1 приведены данные по максимально возможным вероятностям обнаружения дефек-

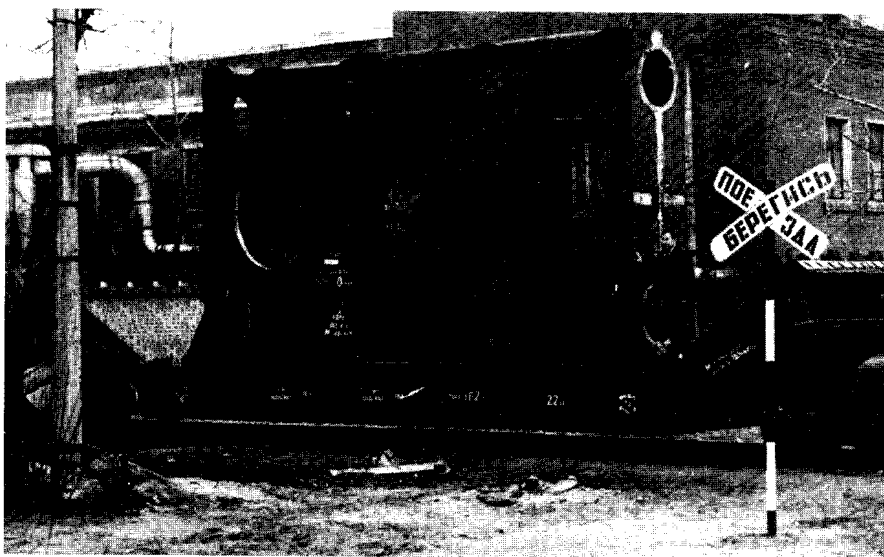


Рис. 1. Технологическая дефектность стальной отливки наружного ползуна кривошипного листоштамповочного пресса двойного действия

Таблица 1

Вид НК (j)	Дефекты поверхности						Несоответствие по структуре		Несплошности в теле отливки					Несоответствие по геометрии		Вероятность обнаружения дефектности $P_{j\Sigma}$
	залив	плена	вмятина	другие механические повреждения	неметаллические включения	ликвидация	флокен	горячая трещина	холодная трещина	рыхлота	газовая раковина	утяжина	пористость	нелитина	разностность	
	Вероятность обнаружения $P_{обн\ ji}$															
Оптический (О)	0,8	0,6	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,25
Радиационный (Р)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0,6	0,44
Магнитный (М)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,6	0,12
Капиллярный (К)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,11
Вихретоковый (В)	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,8	0,4	0,6	0,25
Акустический (А)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	1,0	0,6	0,6	1,0	0,52

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

тов $P_{обн\ ji}$, присущих отливкам из стали (согласно ГОСТ 19200—80), различными видами НК. Данные получены переводом балльных оценок работы [4] в вероятностные и уточнены по результатам работ ЗАО «Прочность». Под оптическим видом (О) НК в табл. 1 понимается визуальный и инструментальный контроль, под радиационным (Р) — рентгенография, под акустическим (А) — ультразвуковое обследование. Вероятность обнаружения дефектности вычислялась из условия, что в отливке с вероятностью, равной единице, присутствуют все возможные дефекты, определяемые ГОСТом. Однако, если известны так называемые субъективные вероятности $P_{суб\ i}$, т.е. вероятности наличия в отливке i -го вида дефекта при применении определенной технологии литья на конкретном предприятии-изготовителе, то вероятность обнаружения дефектности будет определяться

$$P_{j\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{обн\ ji} P_{суб\ i}, \quad (1)$$

где n — число видов дефектов, в совокупности составляющих дефектность.

При обследовании отливки несколькими видами НК вероятность обнаружения дефекта определяем по известной зависимости [5]

$$P_{обн\ ki} = 1 - (1 - P_{k1i})(1 - P_{k2i}) \dots (1 - P_{kji}). \quad (2)$$

В формуле (2) индекс k относится к сочетанию видов НК и принимает значения от 1 до 32, j — к виду НК внутри сочетания ($j_{max} = 6$). Общепринято, что визуальный и инструментальный контроль обязателен и предшествует проведению НК другими способами, поэтому в табл. 2 в каждом сочетании присутствует оптический метод (О). Вероятность обнаружения дефектности сочетанием видов НК ($P_{k\Sigma}$) определялась по выражению, аналогичному (1), при $P_{суб\ i} = 1$.

Всем видам НК сопутствуют ошибки, завышающие или занижающие измеряемые характеристики и степень их опасности. Соответственно эти ошибки называют ошибками первого рода χ_α (ложное забракование) и второго рода χ_β (пропуск критических дефектов). Ранее считалось, что эти ошибки соответствуют рискам изготовителя (перебраковка) — α и рискам потребителя (недобраковка) — β . Однако исследуемые крупногабаритные литые детали (в рассматриваемом случае ползун) определяют работоспособность изделия, частью конструкции которого являются. Выход из строя такого изделия (крупногабаритного кривошипного пресса) по вине изготовителя в условиях рынка влечет наложение на предприятие-изготовитель штрафных санкций, включающих в себя как минимум стоимость новой детали, доставку, стоимость демонтажа-монтажа и компенсацию простоя изделия. Таким образом, недобраковка ответственной детали является также риском изготовителя. Поскольку обнаружение дефектности и невыявление ее составляют полную группу событий, то вероятность недобраковки $P_{нк\Sigma}$ по дефектности определяем по следующему выражению:

$$P_{нк\Sigma} = 1 - P_{к\Sigma}.$$

Примем, что каждый вид НК дает вероятность ложного обнаружения браковочного дефекта 0,1 (верхняя граница интервала, полученного по результатам работ ЗАО «Прочность»). Так как из рассмотрения исключили субъективный фактор, то ложные срабатывания возникают из-за наличия нерегулируемых и неучитываемых факторов (артефакты, неисключаемые помехи в акустическом тракте дефектоскопа и т.д.). Однако каждый вид НК может дать ложное срабатывание только на тех видах дефектов, которые он в принципе определяет. Приняли, что если i -й дефект определяется m видами НК, то вероятность ложного выявления де-

Таблица 2

Сочетание видов НК (к)	Залив	Плена	Вмятина	Другие механические повреждения	Неметаллические, металлические	Ликвидация	Фло-кен	Горячая трещина	Холодная трещина	Рыхлота	Газовая раковина	Утяжина	Пористость	Неслитина	Разностенность	Вероятность обнаружения дефектности
О	0,80	0,60	0,80	0,80	0,80	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,25
О+Р	0,80	0,60	0,80	0,80	0,80	0,40	0,00	0,60	0,76	0,80	0,80	0,80	0,80	0,64	0,60	0,67
О+М	0,80	0,60	0,80	0,80	0,00	0,00	0,80	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,40	0,40	0,60	0,37
О+К	0,80	0,60	0,80	0,80	0,00	0,00	0,00	0,40	0,64	0,40	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,35
О+В	0,88	0,60	0,88	0,80	0,40	0,00	0,00	0,40	0,64	0,00	0,00	0,00	0,80	0,64	0,60	0,44
О+А	0,80	0,60	0,80	0,80	0,00	0,00	0,80	0,80	0,89	0,60	0,80	1,00	0,60	0,76	1,00	0,74
О+Р+К	0,80	0,60	0,80	0,80	0,80	0,40	0,80	0,60	0,76	0,80	0,80	0,80	0,88	0,64	0,84	0,74
О+Р+В	0,88	0,60	0,88	0,80	0,88	0,40	0,00	0,76	0,86	0,80	0,80	0,80	0,96	0,78	0,84	0,74
О+Р+А	0,80	0,60	0,80	0,80	0,96	0,40	0,80	0,92	0,95	0,92	0,96	1,00	0,92	0,86	1,00	0,85
О+М+К	0,80	0,60	0,80	0,80	0,00	0,00	0,80	0,40	0,64	0,40	0,00	0,00	0,64	0,40	0,60	0,46
О+М+В	0,88	0,60	0,88	0,80	0,40	0,00	0,80	0,40	0,64	0,00	0,00	0,00	0,88	0,64	0,84	0,52
О+М+А	0,80	0,60	0,80	0,80	0,80	0,00	0,96	0,80	0,88	0,60	0,80	1,00	0,76	0,76	1,00	0,76
О+М+Р	0,80	0,60	0,80	0,80	0,80	0,40	0,80	0,60	0,76	0,80	0,80	0,80	0,88	0,64	0,84	0,74
О+К+В	0,88	0,60	0,88	0,80	0,40	0,00	0,00	0,64	0,78	0,40	0,00	0,00	0,88	0,64	0,60	0,50
О+К+А	0,80	0,60	0,80	0,80	0,80	0,00	0,80	0,88	0,93	0,76	0,80	1,00	0,76	0,76	1,00	0,77
О+В+А	0,88	0,60	0,88	0,80	0,88	0,00	0,80	0,88	0,93	0,60	0,80	1,00	0,92	0,86	1,00	0,79
О+Р+М+В	0,88	0,60	0,88	0,80	0,88	0,40	0,80	0,76	0,86	0,80	0,80	0,80	0,98	0,78	0,94	0,80
О+Р+М+А	0,80	0,60	0,80	0,80	0,96	0,40	0,96	0,92	0,95	0,92	0,96	1,00	0,95	0,86	1,00	0,86
О+М+К+В	0,88	0,60	0,88	0,80	0,40	0,00	0,80	0,64	0,78	0,40	0,00	0,00	0,93	0,64	0,84	0,57
О+М+К+А	0,80	0,60	0,80	0,80	0,80	0,00	0,96	0,88	0,93	0,76	0,80	1,00	0,86	0,76	1,00	0,78
О+М+К+Р	0,80	0,60	0,80	0,80	0,80	0,40	0,80	0,76	0,86	0,88	0,80	0,80	0,93	0,64	0,84	0,77
О+К+В+А	0,88	0,60	0,88	0,80	0,88	0,00	0,80	0,93	0,96	0,76	0,80	1,00	0,95	0,86	1,00	0,81
О+К+В+Р	0,88	0,60	0,88	0,80	0,88	0,40	0,00	0,86	0,91	0,88	0,80	0,80	0,98	0,78	0,84	0,75
О+Р+К+А	0,80	0,60	0,80	0,80	0,96	0,40	0,80	0,95	0,97	0,95	0,96	1,00	0,95	0,86	1,00	0,82
О+В+А+Р	0,88	0,60	0,88	0,80	0,98	0,40	0,80	0,95	0,97	0,92	0,96	1,00	0,98	0,91	1,00	0,87
О+М+В+А	0,88	0,60	0,88	0,80	0,88	0,00	0,96	0,88	0,93	0,60	0,80	1,00	0,95	0,86	1,00	0,76
О+Р+М+К+В	0,88	0,60	0,88	0,80	0,88	0,40	0,80	0,86	0,91	0,88	0,80	0,80	0,99	0,78	0,94	0,81
О+Р+М+К+А	0,80	0,60	0,80	0,80	0,96	0,40	0,96	0,95	0,97	0,95	0,96	1,00	0,97	0,86	1,00	0,87
О+Р+К+В+А	0,88	0,88	0,60	0,80	0,98	0,40	0,80	0,97	0,98	0,95	0,96	1,00	0,99	0,91	1,00	0,87
О+Р+А+М+В	0,88	0,88	0,60	0,80	0,98	0,40	0,96	0,96	0,97	0,92	0,96	1,00	0,97	0,86	1,00	0,88
О+М+К+В+А	0,88	0,60	0,88	0,80	0,88	0,00	0,96	0,93	0,96	0,76	0,80	1,00	0,97	0,86	1,00	0,82
О+Р+М+К+В+А	0,88	0,60	0,88	0,80	0,98	0,40	0,96	0,97	0,98	0,95	0,96	1,00	1,00	0,91	1,00	0,89

фекта уменьшается в m раз. Для рассматриваемой дефектности и видов НК ее определяющих $m_{\max} = 5$ (соответствует холодной трещине при сочетании $O + P + K + B + A$). С учетом принятых допущений для вероятности ложных сигналов, приводящих к перебраковке по дефектности, запишем

$$P_{лk\Sigma} = \frac{1}{10l} \sum_{i=1}^l \frac{1}{m} [1 - (1 - P_{k1i})(1 - P_{k2i}) \dots (1 - P_{kmi})],$$

где l — количество дефектов, определяемых данным сочетанием видов НК ($P_{обн ki} \neq 0$).

Численные значения вероятностей недобраковки и ложного определения дефектности (перебраковки) приведены в табл. 3 (графы 3, 4). Максимальная вероятность обнаружения браковочной дефектности (0,89) соответствует обследованию отливки всеми шестью рассматриваемыми видами НК. Однако такое обследование весьма трудоемко и затратно. Для выявления оптимального сочетания НК, построим таблицу рисков для всех возможных событий. Примем, что все события являются независимыми. Тогда (по предельной теореме Лапласа) — вероятность возникновения каждого события определяется следующим образом $P_{\text{соб}} = 1/s$ (где $s = 5$ — число событий). Применительно к анализу технических систем, риск рассматривается как вероятность потери [6] и представляется в форме произведения потери на вероятность ее возникновения.

Рассмотрим риски предприятия-изготовителя (α_{ks}) отливки наружного ползуна кривошипного листоштамповочного пресса двойного действия (см. рис. 1). Введем следующие обозначения: C — себестоимость отливки; $Ш$ — штрафные санкции; $И$ — стоимость ликвидации исправимых дефектов; $Ц_j$ — стоимость обследования отливки j -м видом НК. Примем в ценах 2006 г. (в тыс. руб.) $C = 300,0$; $Ш = 2000,0$; $И = 30,0$; $Ц_0 = 1,0$; $Ц_p = 2,3$; $Ц_M = 9,4$; $Ц_k = 22,4$; $Ц_B = 4,0$; $Ц_A = 11,0$ (цены на обследование назначены в соответствии с прейскурантом № 26-05-28 ч. V с коэффициентом 2006 г. 1,08 и учитывают необходимые подготовительные работы для обследования, например зачистку поверхности). Обозначим через $Ц_k$ стоимость обследования сочетанием видов НК (тыс. руб.). Расчетные данные по рискам занесены в табл. 3 (графы 6–10).

Для выбора оптимальной стратегии используем критерий Вальда (критерий пессимиста), Сэвиджа (критерий оптимиста) и Лапласа [7]. Для рисков критерий Лапласа сформулируем следующим образом: оптимальным будет тот вариант сочетания НК, которому соответствует минимальное значение из суммы рисков по всем возможным событиям

$$\left(\sum_{s=1}^5 \alpha_{ks} \right)_{\text{опт}} = \min_k \sum_{s=1}^5 \alpha_{ks}.$$

Для выявления оптимальной стратегии по критерию Вальда используем принцип минимакса

$$(\alpha_{ks})_{\text{отп}} = \min_k \max_s \alpha_{ks}.$$

Критерий Вальда базируется на следующих принципах: с появлением события необходимо считаться, реализуется лишь малое количество решений, риск недопустим. Критерий Сэвиджа наоборот допускает некоторый риск при принятии решения. Постулаты этого критерия базируются на минимизации сожалений об утраченной выгоде. Для анализа рисков технических систем используем принцип максимина при формулировке этого критерия

$$(\alpha_{ks})_{\text{отп}} = \max_s \left(\alpha_{ks} - \min_k \alpha_{ks} \right).$$

Все рассмотренные критерии указали на сочетание $O + P$ ($P_{k\Sigma} = 0,67$). Интересно, что в рассматриваемом случае даже осторожный критерий Вальда не указывает на необходимость обследования всеми шестью видами НК.

Для сравнения был проведен риск-анализ предприятия-изготовителя при определении браковочной дефектности стальной отливки стойки станины кривошипного горячештамповочного пресса (рис. 2). В этом случае критерии Лапласа и Сэвиджа указали на сочетание $O + P + A$ ($P_{k\Sigma} = 0,85$). Критерий Вальда добавляет к этому сочетанию вихре-токовый вид НК, однако при этом незначительный рост вероятности выявления дефектности (0,02) не оправдан увеличением цены обследования.

Данная методика пока не может быть универсальной при определении оптимального сочетания видов НК, в силу того что не по всем видам НК и типам дефектов собраны и обработаны необходимые статистические данные. После их обработки по новым видам НК и нерассмотренным типам дефектов, а также построения карт

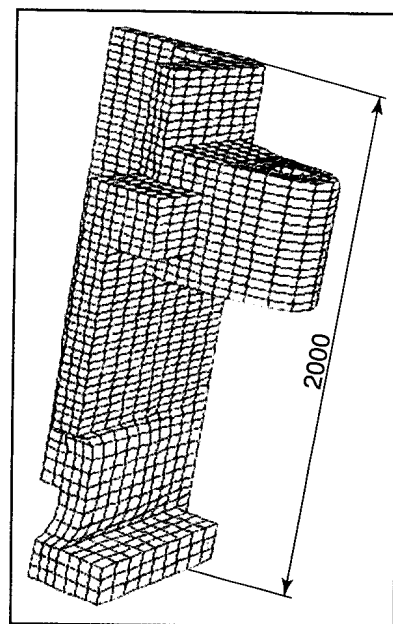


Рис. 2. Браковочная дефектность стальной отливки стойки станины кривошипного горячештамповочного пресса

Таблица 3

Сочетание видов НК (k)	P _{кз}	P _{н.кз}	P _{н.кз}	P _{н.кз}	C _к	Риск предприятия-изготовителя при возникновении следующих событий (α _{кз}), Тys. руб.			Выявлена ложная браковочная дефектность α _{к5} = P _{сод} (C + C _к)P _{н.к}
						Выявленный брак		9	
						неисправим α _{к1} = P _{сод} (C + C _к)P _{кз}	исправим α _{к2} = P _{сод} (И + C _к)P _{кз}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O	0,25	0,75	0,06	1,0	60,2	1,5	0,1	300,2	3,6
O+P	0,67	0,33	0,07	3,3	200,2	4,5	0,4	132,2	4,2
O+M	0,37	0,63	0,06	10,4	648,2	2,9	0,8	253,3	3,7
O+K	0,35	0,65	0,05	23,4	1513,5	3,7	1,6	263,0	3,2
O+B	0,44	0,56	0,05	5,0	305,0	3,0	0,4	224,5	3,1
O+A	0,74	0,26	0,08	12,0	748,8	6,2	1,8	104,6	4,9
O+P+K	0,74	0,26	0,05	25,7	1674,1	8,2	3,8	105,3	3,3
O+P+B	0,74	0,26	0,05	7,3	448,7	5,5	1,1	104,4	3,1
O+P+A	0,85	0,15	0,06	14,3	898,9	7,5	2,4	60,4	3,8
O+M+K	0,46	0,54	0,06	32,8	2186,1	5,8	3,0	219,5	3,9
O+M+B	0,52	0,48	0,05	14,4	908,1	4,6	1,5	193,4	3,1
O+M+A	0,76	0,24	0,07	21,4	1378,3	7,8	3,3	97,0	4,5
O+M+P	0,74	0,26	0,06	12,7	796,8	6,3	1,8	104,7	3,7
O+K+B	0,50	0,50	0,05	27,4	1794,2	5,7	2,7	202,7	3,3
O+K+A	0,77	0,23	0,07	34,4	2300,6	9,9	5,3	93,6	4,7
O+B+A	0,79	0,21	0,06	16,0	1011,2	7,3	2,5	84,7	3,8
O+P+M+B	0,80	0,20	0,06	16,7	1060,4	7,5	2,7	80,7	3,8
O+P+M+A	0,86	0,14	0,05	23,7	1537,1	9,2	4,1	56,7	3,2
O+M+K+B	0,57	0,43	0,05	36,8	2481,8	7,6	4,2	175,2	3,4
O+M+K+A	0,78	0,22	0,06	43,8	3014,8	11,5	6,8	89,9	4,1
O+M+K+P	0,77	0,23	0,06	35,1	2355,4	10,0	5,4	93,6	4,0
O+K+B+A	0,81	0,19	0,05	38,4	2598,9	11,1	6,2	77,5	3,4
O+K+B+P	0,75	0,25	0,06	29,7	1958,4	8,9	4,5	101,5	3,9
O+P+K+A	0,82	0,18	0,06	36,7	2471,4	10,9	6,0	73,3	4,0
O+B+A+P	0,87	0,13	0,04	18,3	1164,9	8,4	3,2	52,5	2,5
O+M+B+A	0,76	0,24	0,05	25,4	1655,8	8,4	3,9	97,2	3,2
O+P+M+K+B	0,81	0,19	0,05	39,1	2654,8	11,2	6,3	77,5	3,4
O+P+M+K+A	0,87	0,13	0,05	46,1	3194,2	13,2	8,0	53,2	3,5
O+P+K+B+A	0,87	0,13	0,02	40,7	2773,32	12,3	7,1	53,1	1,4
O+P+A+M+B	0,88	0,12	0,04	27,7	1818,3	10,2	4,9	48,7	2,6
O+M+K+B+A	0,82	0,18	0,05	47,8	3328,1	12,8	7,8	73,7	3,5
O+P+M+K+B+A	0,89	0,11	0,03	50,1	3511,2	14,3	8,9	45,1	2,1

субъективной дефектности (дефектности, присутствующей изделиям, полученным при применении конкретной технологии на конкретном предприятии-изготовителе) предложенный подход может стать более универсальным. Кроме того, он может быть использован для выбора сочетания видов НК в целях определения эксплуатационной дефектности при прогнозировании остаточного ресурса оборудования.

Список литературы

1. *Власов И.Э., Иванов В.И.* Полезность многократного контроля // *Безопасность труда в промышленности.* — 2005. — № 12. — С. 50–53.

2. *Иванов В.И.* Параметры многочастотной ультразвуковой дефектоскопии // *Дефектоскопия.* — 1978. — № 1. — С. 62–67.

3. *Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для машиностроительных вузов / Под ред. А.Н. Банкетова, Е.Н. Ланского.* — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1982. — 576 с.

4. *Неразрушающий контроль и диагностика/ Под ред. В.В. Клюева.* — М.: Машиностроение, 2003. — 656 с.

5. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. — М.: Наука, 2003. — 576 с.

6. *Хенли Э., Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска. — М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.

7. *Фишберн П.* Теория полезности для принятия решений. — М.: Наука, 1978. — 352 с.