ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 213 1972

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕТАТРОННЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. БЕРДОНОСОВ, В. А. ВОРОБЬЕВ, В. И. ГОРБУНОВ, А. В. ПОКРОВСКИЙ

Радиометрический метод радиационной дефектоскопии с использованием в качестве детекторов излучения сцинтилляционных счетчиков получил распространение, главным образом, благодаря возможности автоматизации и ускорения процесса контроля. В этом его основное преимущество по сравнению с радиографическим методом. Недостатком радиометрических систем является применение сложной аппаратуры управления и автоматики, что ведет к уменьшению надежности установки и в ряде случаев к увеличению стоимости контроля. Кроме того, при работе с радиоэлектронной аппаратурой требуется более высокая квалификация обслуживающего персонала, что также необходимо учитывать при определении эффективности метода контроля. Эффективность метода определяется чувствительностью, производительностью и затратами на контроль всего изделия или единицы его площади (длины.).

При выборе метода регистрации в радиационной дефектоскопии в тех случаях, когда этот выбор не определяется однозначно чувствительностью, или особыми условиями, связанными со спецификой производства, следует рассматривать, кроме чувствительности, такие показатели, как производительность и затраты на контроль. Возможно, что в ряде случаев при соизмеримой чувствительности более выгодным с точки зрения производительности и стоимости окажется применение радиографического метода.

В настоящей работе на основании трех вышеназванных критериев чувствительности, производительности и затрат рассматривается эффективность применения радиометрических систем бетатронной дефектоскопии на базе сцинтилляционного детектора. Следует отметить, что показатели, применяемые нами для оценки эффективности, являются общими для любых радиометрических систем радиационной дефектоскопии.

Вопросы эффективности применения бетатронной радиографии для контроля изделий из стали рассмотрены в работах [2, 4, 5, 8]. Расчет эффективности в работе [2] проведен на максимальную производительность метода, которая находится для заданной энергии бетатрона и толщины поглотителя. Аналогичные показатели, т. е. чувствитель-

ность, производительность, затраты на контроль взяты за основу и для оценки эффективности радиометрического метода регистрации.

В связи с динамикой процесса контроля для радиометрических систем (изделие или источники с детектором непрерывно перемещаются) существует в явном виде зависимость чувствительности от скорости контроля. С увеличением скорости контроля уменьшается число квантов, несущих информацию о дефекте, вследствие чего чувствительность падает. Поэтому оценка производительности метода, согласно методике [2] по формуле

$$W = \frac{S}{T_{\text{пр}}}, \qquad (1)$$

где W — производительность контроля,

S — проконтролированная площадь,

$T_{\text{пр}}$ — полное время просвечивания,

требует уточнения параметра $T_{пр}$ и иного подхода, нежели в [2].

При оценке производительности радиометрического метода полное время просвечивания слагается из собственного времени на контроль t_k и вспомогательного времени $t_{\text{всп}}$, которое, в свою очередь, включает время на подготовку и прогрев аппаратуры t_1, время на установку и съем изделия t_2 время на балансировку и установку чувствительности каналов t_3. Время t_1, t_3 не зависит от типа контролируемого изделия, а время t_2 для изделия близкого класса можно положить одинаковым. В этом случае производительность контроля, определенная по формуле (1), является функцией одной переменной (времени контроля).

Рассмотрим вариант, когда чувствительность контроля задана, что в большинстве случаев соответствует практическим задачам, а величина статической чувствительности, т. е. чувствительности, определенной при скорости контроля, близкой к нулю, лучше заданной. Для сцинтилляционного метода регистрации это соответствует реальным условиям дефектоскопии. Используя в этом случае зависимость чувствительности от скорости контроля, можно выразить время контроля единицы длины, полагая при этом чувствительность постоянной и равной заданной величине.

Тогда производительность контроля, рассчитанная по формуле (1), включающая полученное указанным путем время контроля, будет максимальной для выбранного материала, толщины изделия, энергии и интенсивности источника. Дальнейшее повышение производительности может быть достигнуто увличением числа детекторов или, иными словами, увеличением зоны контроля за один ход изделия при неизменной частоте посылок импульсов излучения и их интенсивности. По имеющимся литературным данным, ширина зоны контроля для бетатронных дефектоскопов со счетчиками составляет 10—11 *см*, а число каналов соответственно равно 5—6 [3, 7]. Поэтому мы в дальнейшем будем рассматривать систему из 5 каналов сцинтилляционных счетчиков с шириной зоны l=10 *см*.

Анализ эффективности радиометрических систем бетатронной дефектоскопии был проведен на трех распространенных в промышленности материалах (стали, алюминии, свинце) для бетатронов с максимальной энергией излучения 15, 25, 30 Мэв. Расчеты выполнены для чувствительности 1,0 и 2,0%. Такие допуски по чувствительности соответствуют промышленным требованиям на контроль.

Чувствительность сцинтилляционного метода регистрации бетатронной дефектоскопии экспериментально исследована для стали в работах [1, 6, 7]. Там же дано аналитическое выражение для расчета чувствительности с учетом динамического режима контроля:

$$\delta h = \frac{(\delta_1^2 + \delta_2^2)^{1/2}\psi}{\mu}, \qquad (2)$$

где δh — абсолютная чувствительность по толщине;

δ_1 — аппаратурная погрешность;

δ_2 — статистическая погрешность;

ψ — коэффициент надежности;

μ — эффективный коэффициент ослабления.

Таким образом, зная энергию и интенсивность излучения источника, параметры детектора и схемы регистрации, можно провести расчет чувствительности для различных условий.

На рис. 1 а, б, в приводятся расчетные данные по статической чувствительности для трех материалов. Для стали и алюминия эти результаты получены и экспериментальным путем и отличаются от расчетных в среднем на 15—20%.

На том же рисунке представлена зависимость чувствительности от скорости контроля, полученная экспериментально.

Для отыскания времени контроля $t_к$ по формуле (1) на графиках рис. 1 г, д, е на уровне 1,0 и 2,0% проводятся две параллельные линии. Точки пересечения этих линий со скоростной зависимостью дают максимальную скорость контроля. Исходя из полученной скорости, простым пересчетом находится далее собственное время контроля одного погонного метра. При ширине зоны контроля 0,1 полученному времени соответствует проконтролированная площадь 0,1 $м^2$.

Из опыта заводской эксплуатации бетатронного дефектоскопа со сцинтилляционными счетчиками $t_1 \approx 15$ *мин;* t_2 в среднем ≈ 12—15 *мин;* $t_3 \approx 15$ *мин.* Учитывая, что прогрев аппаратуры проводится параллельно с установкой изделия, вспомогательное время на контроль $t_{всп} = 30$ *мин.* Таким образом, полное время просвечивания

$$T_{пр} = (t_к + 30) \text{ мин.}$$

На рис. 2 а, б, в приводятся рассчитанные в соответствии с формулой (1) и данными рис. 1 г, д, е зависимости производительности контроля от толщины металла. Графики функций производительности контроля от толщины просвечиваемого материала имеют максимум для всех энергий излучения. Подобный ход зависимостей $W_с = f(h)$ объясняется тем, что чувствительность, которая принята в расчете постоянной, как функция толщины имеет минимум. Точка перегиба на графиках соответствует максимальной для данной энергии излучения и материала статической чувствительности. При определенной максимальной энергии тормозного излучения для всех металлов имеется область толщин, где производительность радиометрического метода контроля меняется незначительно. Увеличение максимальной энергии приводит, кроме общего возрастания производительности, к дополнительному увеличению этого диапазона толщин. Аналогичное влияние на зависимость производительности от толщины просвечиваемого материала оказывает и снижение установленного уровня чувствительности.

На основе полученных ранее данных по зависимости производительности радиографии от толщины (для алюминия и стали) проведен сравнительный анализ производительности радиографического и радиометрического методов контроля. Результаты такого сравнения представлены на рис. 2 г, д, где по оси абсцисс отложена толщина соответствующего материала, а по оси ординат отношение производительностей для радиографии и радиометрической пятиканальной системы дефектоскопа. Как видно из рис. 2 г, д, возрастание отношения $\frac{W_с}{W_р}$ с увеличением толщины становится более выраженным для

(а

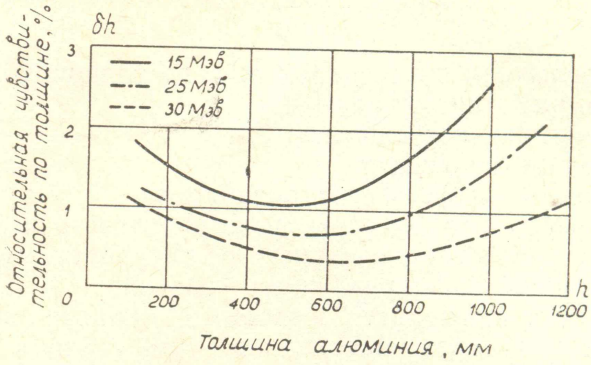
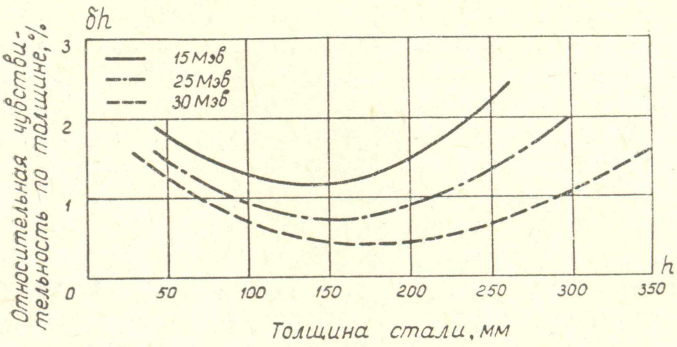


Рис. 1

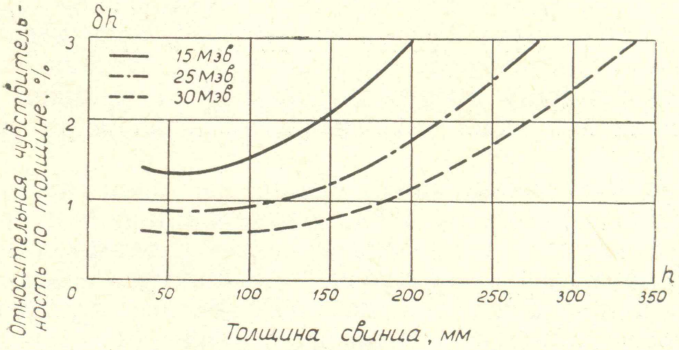
а) Зависимость статической относительной чувствительности сцинтилляционного метода от толщины алюминия для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*

б)

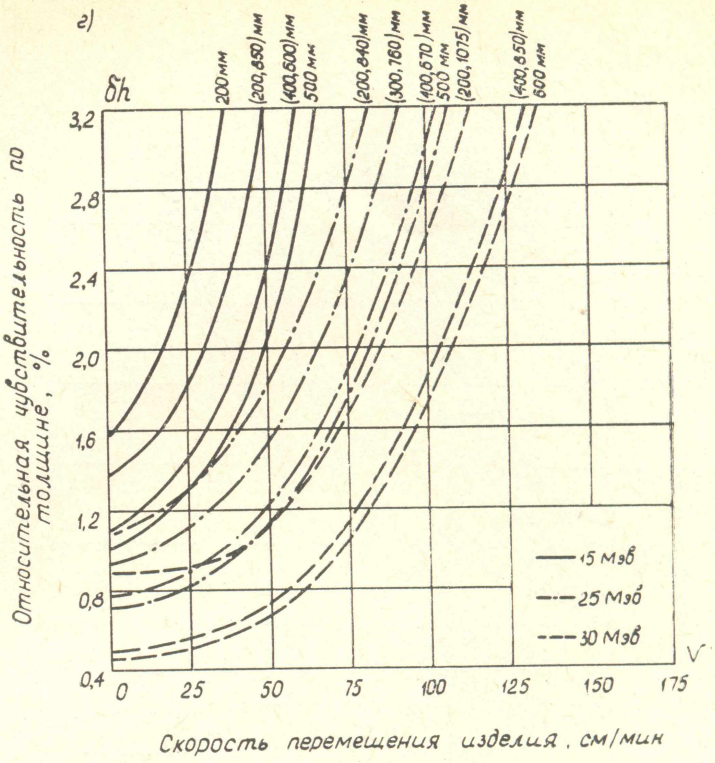


б) Зависимость статической относительной чувствительности сцинтилляционного метода от толщины стали для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*

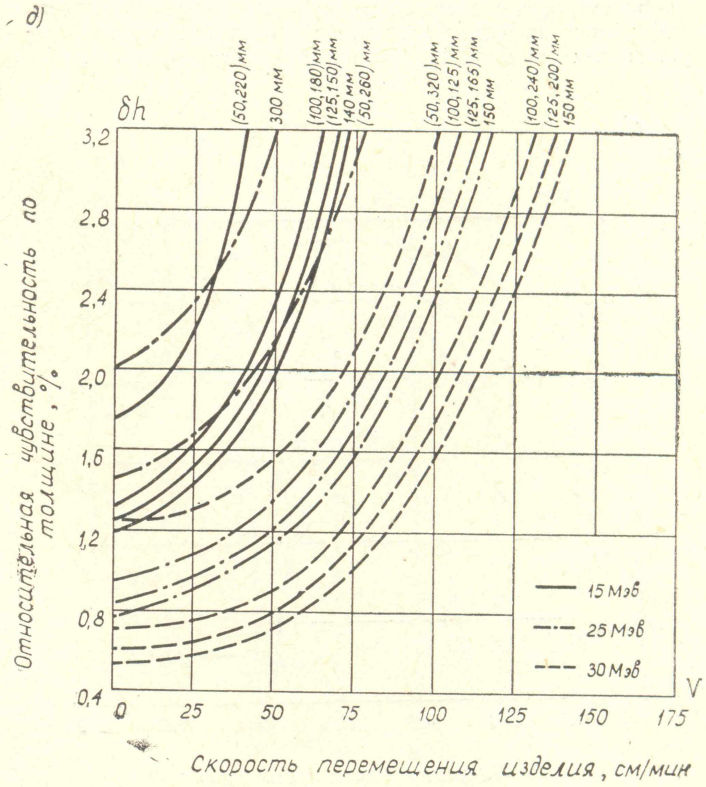
в)



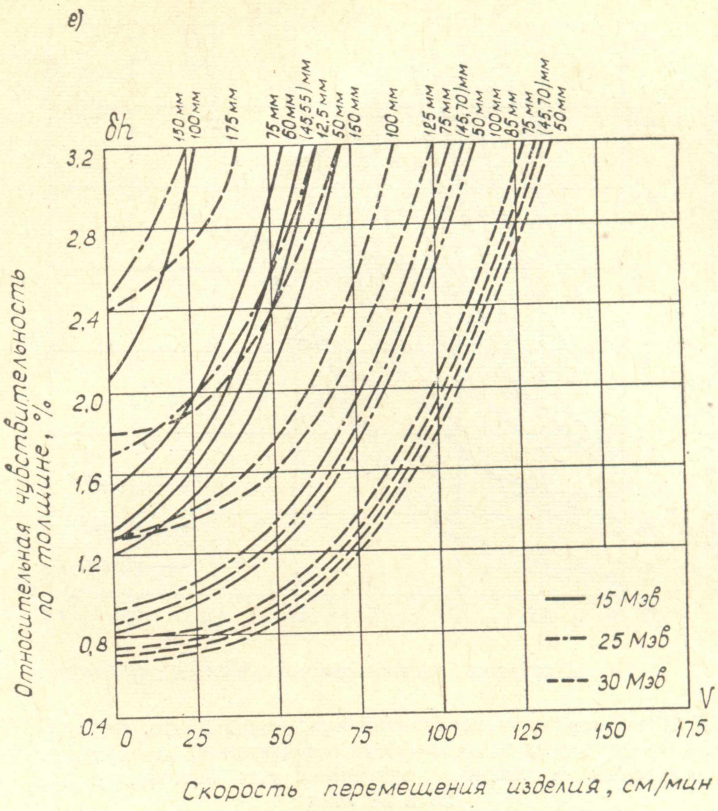
в) Зависимость статической относительной чувствительности сцинтилляционного метода от толщины свинца для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*



г) Зависимость относительной чувствительности сцинтилляционного метода от скорости перемещения изделия при различных толщинах алюминия для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*



д) Зависимость относительной чувствительности сцинтилляционного метода от скорости перемещения изделия при различных толщинах стали для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*



е) Зависимость относительной чувствительности сцинтилляционного метода от скорости перемещения изделия при различных толщинах свинца для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*

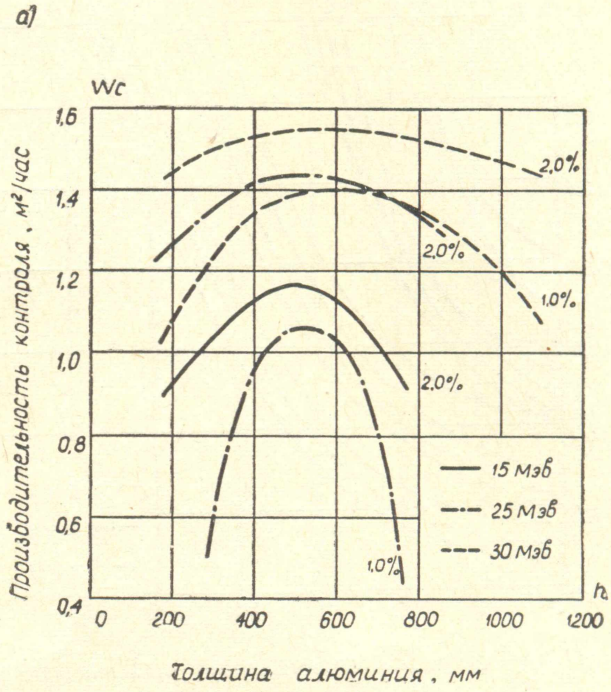
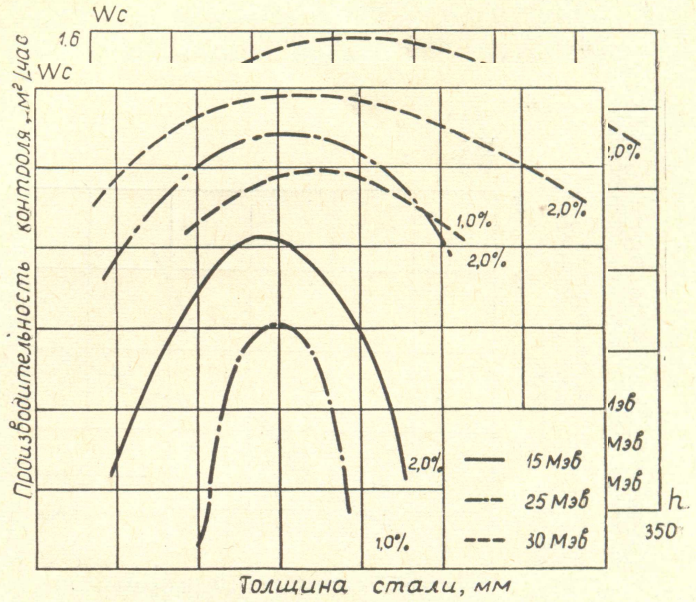


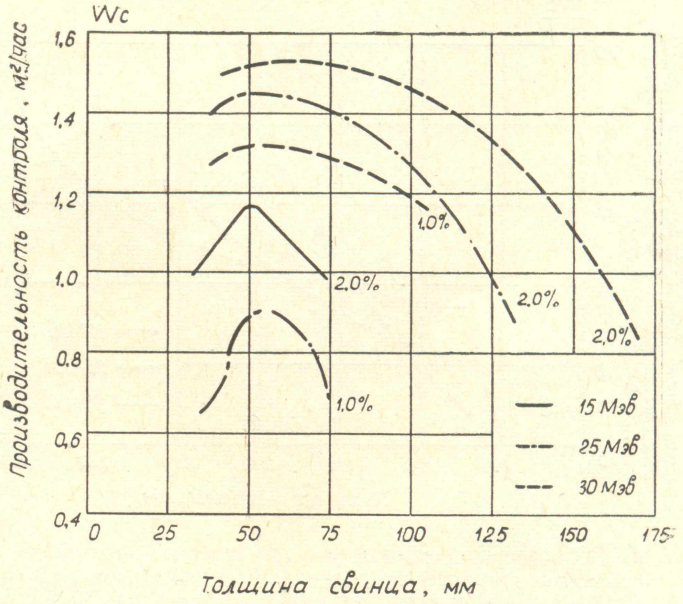
Рис. 2. а) Зависимость производительности сцинтилляционного метода контроля от толщины алюминиевых изделий для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв* и чувствительности 1,0% и 2,0%

(б

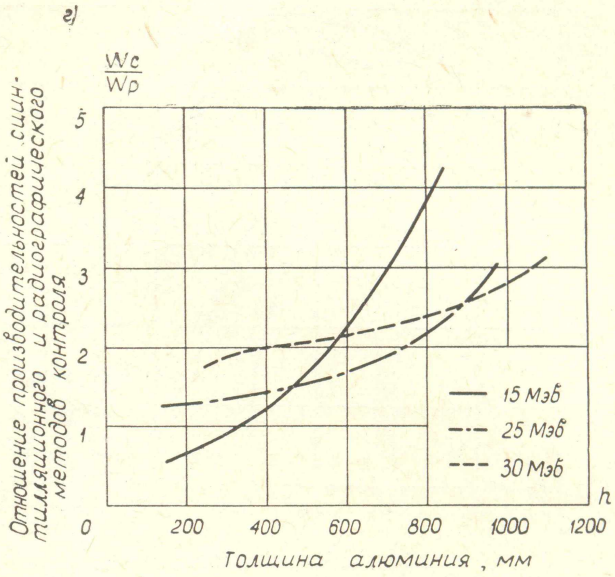


б) Зависимость производительности сцинтилляционного метода контроля от толщины стальных изделий для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв* и чувствительности 1,0% и 2,0%

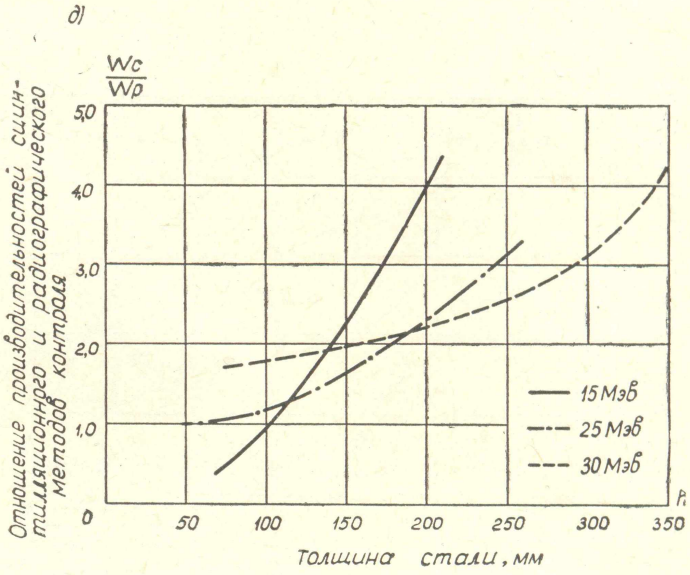
в)



в) Зависимость производительности сцинтилляционного метода контроля от толщины изделий из свинца для бетатронов 15, 25, 30 *Мэв* и чувствительности 1,0% и 2,0%



г) Зависимость отношения производительностей сцинтилляционного и радиографического метода контроля от толщины алюминиевых изделий для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*



д) Зависимость отношения производительностей сцинтилляционного и радиографического метода контроля от толщины стальных изделий для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*

тормозного излучения с меньшей максимальной энергией. На малых толщинах производительность радиографии становится почти соизмеримой с производительностью радиометрического метода регистрации, а для бетатрона 15 Мэв — даже выше. Это можно объяснить применением больших полей облучения в радиографии, малым значением времени экспозиции по сравнению со вспомогательным временем, а также недоиспользованием пучка излучения при радиометрическом методе контроля.

Наряду с производительностью контроля при анализе эффективности необходимо исследовать также стоимость контроля. Нами проведен расчет стоимости контроля 1 $м^2$ для радиографии и радиометрического метода регистрации. Стоимость радиографии определялась по методике [4] с учетом того, что время просвечивания $T_{пр}$, коэффициенты c_1, c_2 были пересчитаны на 1 $м^2$. Результаты затрат на просвечивание изделий из стали и алюминия для радиографического метода приведены на рис. 3 а, б. Для бетатронов 25 и 30 Мэв стоимость радиографического контроля на малых толщинах изменяется незначительно с ростом толщины, а затем резко возрастает, что связано со значительным увеличением времени экспозиции.

Расчет затрат на просвечивание 1 $м^2$ контролируемого изделия при радиометрическом методе регистрации проводился по следующему выражению:

$$C_c = \left(\frac{c_1 A_1}{100 к_1} + \frac{c_2 A_2}{100 к_2} + З_п + Э\right) \cdot T_{пр}, \qquad (3)$$

где C_c — стоимость контроля 1 $м^2$ изделия, *руб*; c_1 и c_2 — отпускная цена соответственно дефектоскопа и бетатрона, *руб*; A_1 и A_2 — нормы амортизации по дефектоскопу и бетатрону, %; $к_1$ и $к_2$ — число часов работы в году дефектоскопа и бетатрона; $З_п$ — средняя заработная плата операторов на 1 *час, руб*; $T_{пр}$ — время просвечивания 1 $м^2$ рассматриваемого изделия.

Величины коэффициентов $З_п$, A_2 и Э взяты из [4], коэффициенты A_1, A_2, $к_1$, $к_2$, c_1, c_2 и потребляемая бетатронным дефектоскопом мощность определены из соответствующей технической документации НИИ электронной интроскопии и составляют: $к_1 = к_2 = 3000$ *час*; $c_1 = 10\,000$ *руб*; $c_2 = 55\,000, 80\,000$ и $100\,000$ *руб* для бетатронов с максимальными энергиями соответственно 15, 25 и 30 Мэв. Потребляемая мощность бетатронных дефектоскопов составляет 10, 20 и 45 *квт*. Время просвечивания $T_{пр}$ определялось по вышеприведенной методике.

Результаты расчета стоимости контроля 1 $м^2$ для максимальных энергий тормозного излучения 15,25 и 30 Мэв приведены на рис. 3 в, г, д.

Зависимость стоимости контроля от толщины просвечиваемого материала имеет минимум, происхождение которого определяется максимумом в зависимости производительности от толщины изделия.

Диапазоны толщин изделий из алюминия, стали, свинца, в которых стоимость контроля изменяется не более чем на 10% (табл. 2), практически не отличаются от пределов по толщинам, приводимым в табл. 1 для производительности контроля. Кроме того, увеличение максимальной энергии излучения и снижение установленного уровня чувствительности расширяет эти диапазоны при уменьшении абсолютной величины стоимости контроля. Таким образом, при выборе энергии излучения из условия неизменной производительности или стоимости контроля в каком-либо интервале толщин с точностью до определенной величины можно исходить как из зависимости производительности, так и из зависимости стоимости от толщины просвечива-

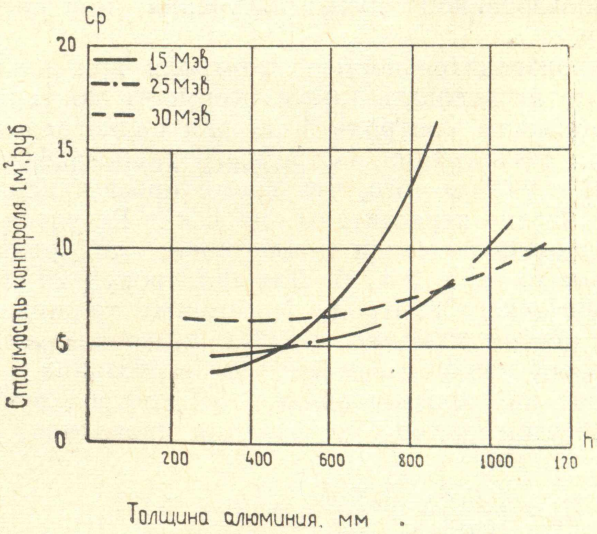
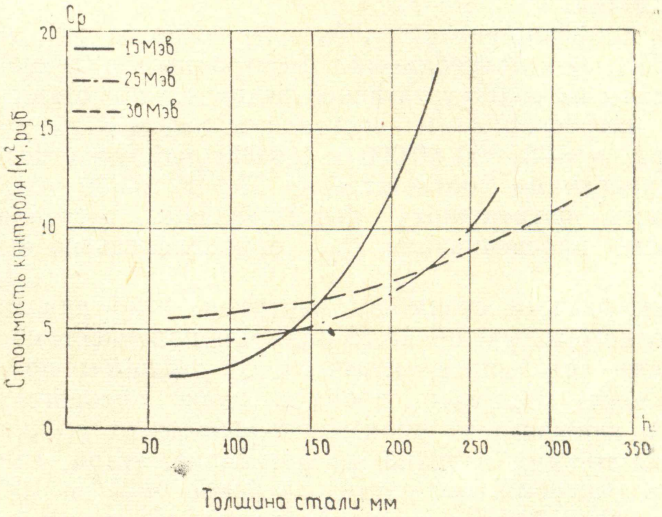
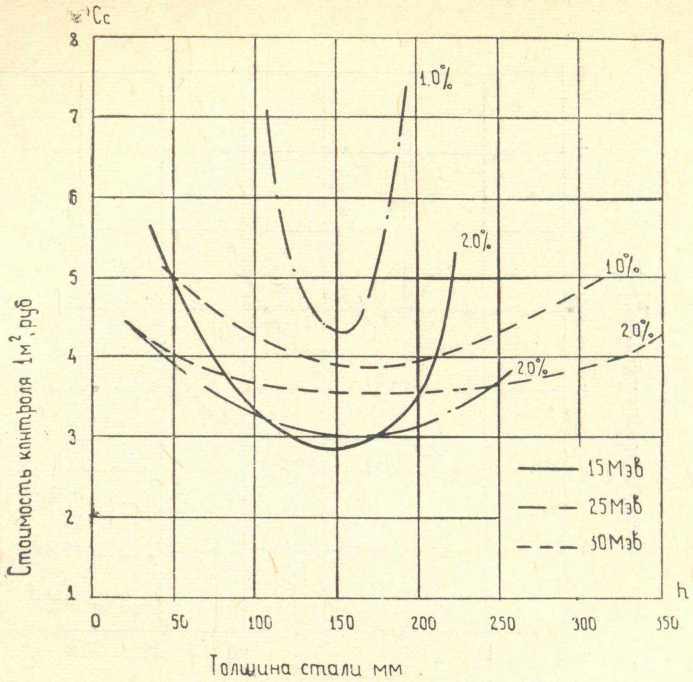


Рис. 3

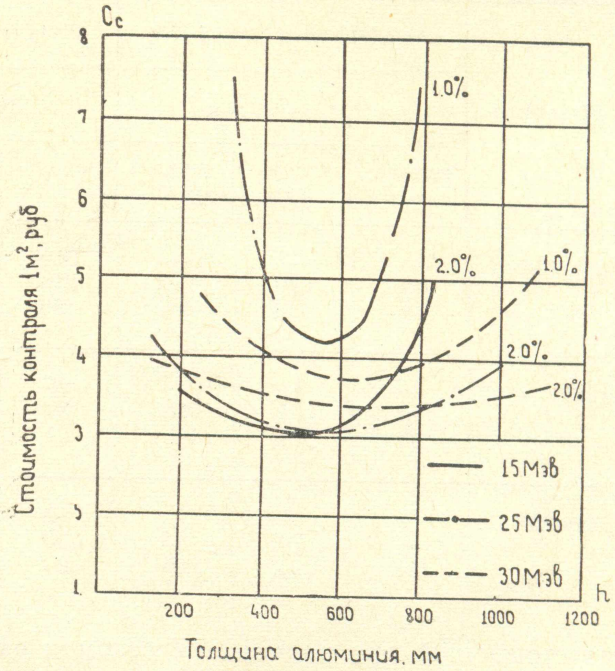
а) Зависимость затрат на просвечивание 1 $м^2$ алюминиевых изделий при радиографическом методе контроля для бетатронов 25 и 30 *Мэв*



б) Зависимость затрат на просвечивание 1 $м^2$ стальных изделий при радиографическом методе контроля для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*

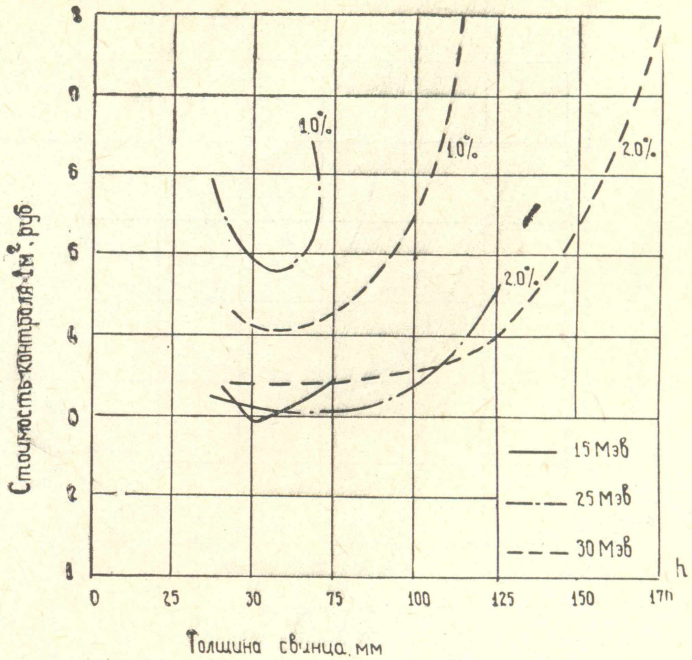


в) Зависимость затрат на просвечивание 1 $м^2$ алюминиевых изделий при сцинтилляционном методе контроля для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*



г) Зависимость затрат на просвечивание 1 $м^2$ стальных изделий при сцинтилляционном методе контроля для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*

емого материала, которые являются с данной точки зрения равнозначными.



д) Зависимость затрат на просвечивание 1 $м^2$ изделий из свинца при сцинтилляционном методе контроля для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*

Таблица 1

Диапазоны толщин в *мм* для различных материалов, в которых производительность радиометрического метода контроля изменяется не более чем на 10%

Максимальная энергия тормозного излучения, *Мэв*	Материал	Чувствительность 1,0%			Чувствительность 2,0%		
		толщины, *мм*			толщины, *мм*		
		начальная	конечная	диапазон	начальная	конечная	диапазон
15	алюминий	—	—	—	310	670	360
25		400	670	270	210	830	620
30		330	930	600	150	1140	990
15	сталь	—	—	—	95	185	90
25		125	175	50	80	235	155
30		95	245	150	60	305	245
15	свинец	—	—	—	40	65	25
25		45	70	25	30	95	65
30		30	95	65	20	120	100

Отношения стоимостей при радиометрическом и радиографическом контроле, рассчитанные для эквивалентных условий, приведены на рис. 4 а, б.

Как видно из данных зависимостей, снижение стоимости радиометрии по сравнению с радиографией с ростом толщины просвечиваемого изделия особенно заметно при максимальной энергии тормозного излучения 15 Мэв, хотя именно для этой энергии имеется диапазон толщин, при которых переход к радиометрическому методу регистрации фактически не эффективен.

Таблица 2

Диапазоны толщин в *мм* для различных материалов, в которых стоимость радиометрического метода контроля изменяется не более, чем на 10%

Максимальная энергия тормозного излучения, МЭВ	Материал	Чувствительность 1,0 %			Чувствительность 2,0 %		
		толщины, *мм*			Толщины, *мм*		
		начальная	конечная	диапазон	начальная	конечная	диапазон
15	алюминий	—	—	—	320	660	340
25		400	670	270	220	830	610
30		340	900	560	160	1100	940
15	сталь	—	—	—	95	180	85
25		125	170	45	80	220	140
30		100	240	140	60	290	230
15	свинец	—	—	—	40	68	28
25		45	70	25	26	90	64
30		30	80	50	15	120	105

Сравнивая зависимости абсолютных величин стоимости контроля от толщины просвечиваемых материалов рис. 3 а, б, в, г, д и отношения стоимостей для радиометрии и радиографии рис. 4 а, б, видим подтверждение существующих в настоящее время тенденций к переходу в дефектоскопии на ридометрические методы регистрации и выгодность использования бетатронов с максимальными энергиями излучения 25 и 30 Мэв, несмотря на их сравнительно высокую стоимость. Эти бетатроны дают не только большую производительность контроля и меньшую стоимость, но и обеспечивают сохранение постоянной производительности и стоимости контроля в более широких диапазонах толщин.

Выводы

1. Из анализа полученных результатов следует, что при радиометрическом методе регистрации так же, как и при радиографическом, для различных бетатронов существуют диапазоны толщин, в которых при фиксированной чувствительности достигается максимальная производительность и минимальные затраты на контроль.

Так, при чувствительности 1,0% для всех материалов во всем диапазоне толщин более эффективен бетатрон с максимальной энергией излучения 30 Мэв, однако, учитывая сравнительно небольшую разницу в производительности и затратах для эквивалентных толщин по стали (120—170) *мм*, в этом диапазоне можно рекомендовать бетатроны с максимальной энергией 25 *Мэв*.

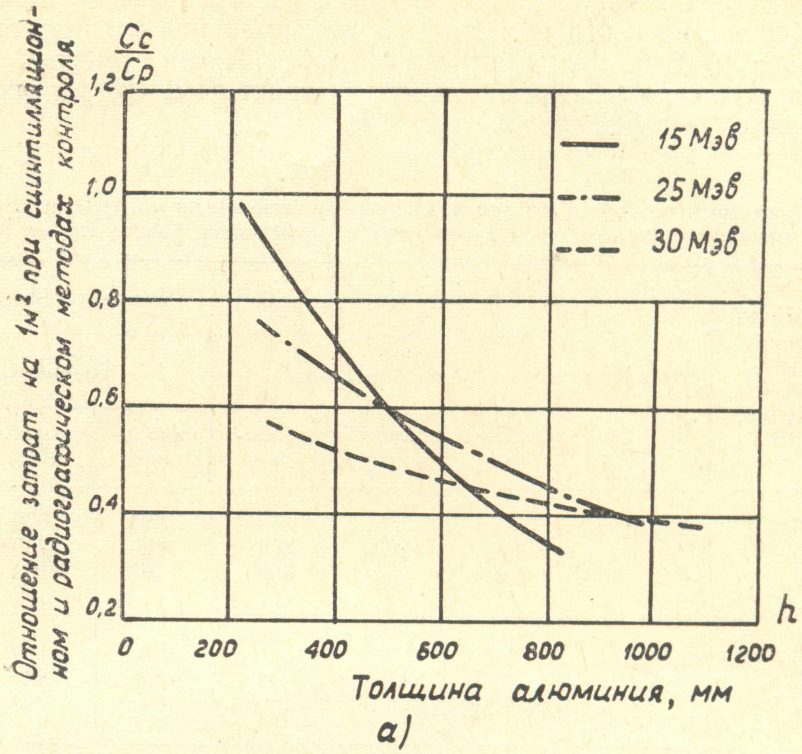
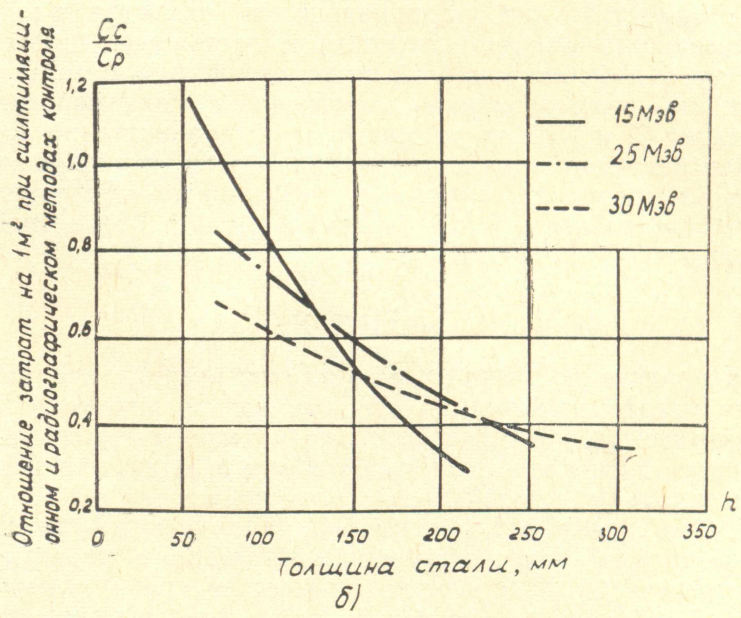


Рис. 4

а) Зависимость отношения затрат на просвечивание 1 $м^2$ при сцинтилляционном и радиографическом методах контроля от толщины алюминиевых изделий для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*



б) Зависимость отношения затрат на просвечивание 1 $м^2$ при сцинтилляционном и радиографическом методах контроля от толщины стальных изделий для бетатронов 15, 25 и 30 *Мэв*

При чувствительности 2,0% до 200 *мм* по стали можно применять бетатрон с максимальной энергией 15 Мэв, в диапазоне толщин (200—300) *мм*, — бетатрон с энергией излучения 25 Мэв и, начиная с 300 *мм*, бетатрон с энергией 30 Мэв.

2. Отношения производительностей и затрат на контроль для радиометрического и радиографического методов показывают, что при контроле изделий по площади радиометрический метод эффективно применять для всех бетатронов на больших толщинах, а именно после (100—120) *мм* по стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Горбунов и А. В. Покровский. Дефектоскопия, № 5, 38, 1965.
2. В. А. Воробьев, В. И. Горбунов и А. В. Покровский. Дефектоскопия, № 1, 93, 1967.
3. О. Ф. Булаев, В. А. Воробьев, В. И. Горбунов и А. В. Покровский. Сварочное производство, № 1, 29, 1968.
4. В. И. Постников. Методика определения эффективности применения радиоактивных изотопов. М., Атомиздат, 1964.
5. А. Е. Бузынов. Эффективность применения гамма-излучения бетатрона для контроля качества стальных изделий, ГОСИНТИ, М, 1963.
6. Н. И. Давиденко, А. А. Самохвалов, И. Г. Факидов. Сб. Бетатронная гамма-дефектоскопия стали. М., Изд-во АН СССР, 1961.
7. А. В. Покровский. Исследование сцинтилляционного метода бетатронной дефектоскопии и его применение для контроля толстостенных сварных соединений, канд. диссертация, Томск, 1967.
8. А. А. Воробьев, В. А. Воробьев, В. И. Горбунов, Г. В. Титов. Бетатронная дефектоскопия материалов и изделий. М., Госатомиздат, 1965.

2. Заказ 5059.