

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **033928**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2019.12.10

(51) Int. Cl. **G01N 3/34 (2006.01)**
G01N 3/00 (2006.01)

(21) Номер заявки
201700595

(22) Дата подачи заявки
2017.10.23

**(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ
ДЕФОРМИРОВАНИИ**

(43) **2019.04.30**

(96) **2017/EA/0083 (BY) 2017.10.23**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ (БГУ) (BY)**

(56) SU-A1-1820278

Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А.
Физико-механическое моделирование процессов
разрушения - СПб.: Политехника, 1993. - 391 с.,
с. 242-249

DE-B4-102009034188

CA-A1-2512425

US-A-5079955

(72) Изобретатель:
**Богданович Александр
Вальдемарович, Сосновский
Леонид Адамович, Веселуха Вадим
Михайлович (BY)**

(57) Изобретение относится к области механических испытаний материалов, в частности к определению их способности сопротивляться росту трещин в условиях статического упругопластического деформирования, и может быть использовано для оценки характеристик трещиностойкости пластичных материалов, в том числе низколегированных трубных сталей на основе измерения величины утяжки образца в плоскости его излома. Задачей изобретения является создание способа, позволяющего при испытаниях на трещиностойкость применять образец - элемент трубы большого (более 400 мм) диаметра, сохраняющего геометрию трубы линейной части трубопровода и ее пластические свойства, а также использовать при оценке коэффициента интенсивности напряжений в образце с трещиной свойство окружающей вершину трещины пластической зоны поглощать энергию в процессе развития трещины и таким образом оказывать влияние на сопротивление материала росту трещины в условиях упругопластического деформирования, что позволяет применить традиционный параметр - коэффициент интенсивности напряжений, а также деформационный параметр - утяжку образца в плоскости его излома - для определения силовых и деформационных характеристик трещиностойкости материала при упругопластическом деформировании.

B1

033928

033928

B1

Изобретение относится к области механических испытаний материалов, в частности к определению их способности сопротивляться росту трещин в условиях статического упругопластического деформирования, и может быть использовано для оценки характеристик трещиностойкости пластичных материалов, в том числе низколегированных трубных сталей на основе измерения величины утяжки образца в плоскости его излома.

В соответствии с известным способом [1] для определения вязкости разрушения материала при статическом нагружении K_{Ic} необходимо выбрать наиболее рациональные (по материалоемкости и соответствию схеме нагружения в реальной детали) форму и размеры образцов, предварительно вырастить в них при циклическом нагружении искусственную трещину, обеспечив необходимую точность регистрации длины трещины и предельной нагрузки в процессе проведения эксперимента, затем осуществить статическое нагружение образца с заданной скоростью до страгивания трещины; при этом строится диаграмма в координатах "нагрузка-перемещение", на которой фиксируется нагрузка в момент страгивания трещины, и ее численное значение подставляется в формулу линейной механики разрушения для оценки коэффициента интенсивности напряжений K_I . Если выполняются установленные [1] условия плоской деформации, то полученное критическое значение K_{Ic} коэффициента интенсивности напряжений считается характеристикой вязкости разрушения материала. В противном случае (что характерно для образцов из пластичных материалов) в момент страгивания трещины определяется только условное предельное значение K_Q коэффициента интенсивности напряжений, которое не считается характеристикой материала.

Недостатком этого способа является то, что, по существу, при оценке коэффициента интенсивности напряжений не учитывается важное свойство окружающей вершину трещины в образце пластической зоны поглощать энергию в процессе развития трещины и, таким образом, оказывать влияние на сопротивление материала росту трещины в условиях упругопластического деформирования.

Наиболее близким по технической сущности является способ определения характеристик трещиностойкости [2], согласно которому для образца предварительно определяют удельную мощность тепла, выделяемого пластической зоной в устье надреза; образец с надрезом подвергают статическому растяжению до разрушения с постоянной скоростью нагружения, непрерывно измеряя температуру в устье надреза и нагрузку в образце, определяют момент страгивания трещины и нагрузку в этот момент по графику зависимости нагрузки от температуры (в точке перегиба кривой); указанную нагрузку затем используют для расчета параметров трещиностойкости.

Недостатком этого способа является то, что пластическая деформация в окрестности вершины трещины (устье надреза) непосредственно не учитывается при определении характеристик трещиностойкости образца из пластичного материала, а принято во внимание только тепловыделение в устье трещины, так называемый термопластический эффект, вызванный пластическим деформированием материала под действием внешней силы. Кроме того, при способе [2] используется стандартный образец, для изготовления которого из трубы трубопровода применяются технологические операции (в том числе правка), оказывающие влияние на пластические свойства материала, что ведет и к соответствующему изменению характеристик трещиностойкости.

Задачей изобретения является создание способа, позволяющего при испытаниях на трещиностойкость применять образец - элемент трубы диаметром более 400 мм, сохраняющего геометрию трубы линейной части трубопровода и ее пластические свойства, а также использовать при оценке коэффициента интенсивности напряжений в образце с трещиной свойство окружающей вершину трещины пластической зоны поглощать энергию в процессе развития трещины и, таким образом, оказывать влияние на сопротивление материала росту трещины в условиях упругопластического деформирования, что позволяет применить традиционный параметр - коэффициент интенсивности напряжений, а также деформационный параметр - утяжку образца в плоскости его излома - для определения силовых и деформационных характеристик трещиностойкости материала при упругопластическом деформировании.

Поставленная задача достигается тем, что в способе определения характеристик трещиностойкости материалов при статическом упругопластическом деформировании, заключающемся в том, что образец с надрезом и предварительно выращенной усталостной трещиной подвергают статическому внецентренному растяжению до разрушения с заданной скоростью нагружения, непрерывно измеряя нагрузку в образце и перемещение берегов трещины, определяют момент страгивания трещины и нагрузку в этот момент, производят построение диаграммы в координатах "нагрузка - перемещение", измеряют утяжку образца - элемента трубы, сохраняющего геометрию и толщину стенки трубы диаметром более 400 мм и ее пластические свойства, в плоскости его излома, коэффициент интенсивности напряжений вычисляют по формуле, учитывающей действительную площадь сечения образца в плоскости излома:

$$K_I^F = \frac{P}{t_0 \sqrt{B}} \omega_F^{1/2} Y(\omega_F),$$

где $\omega_F = F_1/F_0$ - локальная мера поврежденности образца с трещиной;

F_0 - номинальная (до испытаний) площадь сечения образца в плоскости излома;

F_1 - фактическая площадь сечения образца в плоскости излома, поврежденная трещиной длиной l , определяемая с учетом пластической деформации сечения;

$Y(\omega_F)$ - поправочная функция, определяемая с учетом пластической деформации (ω_F) по формуле:

$$Y(\omega_F) = 29,6 - 185,5(\omega_F) + 655,7(\omega_F)^2 - 1017(\omega_F)^3 + 638,9(\omega_F)^4;$$

t_0, B - номинальные размеры опасного сечения образца до испытания,

производят построение диаграммы статического упругопластического разрушения образца с трещиной в координатах "коэффициент интенсивности напряжений, вычисленный с учетом поправки на пластичность - утяжка образца", и с помощью диаграмм "нагрузка - перемещение" и статического упругопластического разрушения образца с трещиной определяют ряд новых силовых $K_{Ic}^F, K_{Ic}^*, K_{sc}^*, K_{max}^F, K_0^*$ и деформационных $\phi_c, \phi_{Pmax}, \phi_s$ характеристик, а также уточняют значение известной K_{Ic}^F характеристики статической трещиностойкости.

В результате после проведения стандартных испытаний на статическую трещиностойкость, измерения утяжки образца в плоскости его излома, вычисления величины коэффициента интенсивности напряжений с учетом предложенной поправки на пластичность и построения диаграммы СУПРОТ определяют ряд силовых и деформационных характеристик трещиностойкости при упругопластическом деформировании, позволяющих учесть важное свойство окружающей вершину трещины в образце пластической зоны поглощать энергию в процессе развития трещины и комплексно охарактеризовать сопротивление пластичного конструкционного материала развитию трещин.

Сущность изобретения поясняется фиг. 1-6. На фиг. 1 представлена схема испытания компактного образца - элемента трубы большого диаметра при внецентренном растяжении, на фиг. 2 - схема вырезки образца из такой трубы (например, трубы линейной части нефтепровода) с требуемой ориентацией надреза-трещины (например, в осевом направлении трубы), на фиг. 3 - диаграмма "нагрузка P - перемещение V берегов трещины" для компактного образца - элемента трубы диаметром 820 мм (из стали 17Г1С), на фиг. 4 - схема измерения утяжки (уширения) компактного образца в плоскости излома, на фиг. 5 - схема D- и Q-диаграмм СУПРОТ, на фиг. 6 - экспериментальная Q-диаграмма СУПРОТ для компактного образца - элемента трубы диаметром 820 мм линейной части нефтепровода из стали 17Г1С.

Способ осуществляется следующим образом.

Испытания компактных образцов, вырезанных из трубы линейной части трубопровода (фиг. 2), на трещиностойкость при статическом нагружении проводят в соответствии с ГОСТом 25.506 [1] по схеме (фиг. 1) в два этапа:

этап 1: производится предварительное выращивание трещины в образце от надреза при циклическом нагружении;

этап 2: производится статическое нагружение до разрушения (разделение образца на две части).

При этом непрерывно измеряют нагрузку в образце, перемещение берегов трещины и ее длину с построением диаграммы "нагрузка P - перемещение V берегов трещины" (фиг. 3), определяют момент срагивания трещины и нагрузку в этот момент по ГОСТу 25.506-85 [1]. После завершения нагружения образца измеряют утяжку (уширение) ϕ , как показано на фиг. 4.

По полученным в результате испытания значениям нагрузки длины трещины и с учетом пластической деформации (утяжки) опасного сечения образца рассчитывают величину коэффициента интенсивности напряжений по формуле:

$$K_I^F = \frac{P}{t_0 \sqrt{B}} \omega_F^{1/2} Y(\omega_F), \quad (1)$$

где локальная мера поврежденности образца с трещиной $\omega_F = F_1/F_0$ (F_0 - номинальная (до испытаний) площадь опасного сечения образца, F_1 - фактическая площадь, поврежденная трещиной длиной l) определяется с учетом пластической деформации сечения;

$Y(\omega_F)$ - поправочная функция, определяемая с учетом пластической деформации (ω_F) по формуле:

$$Y(\omega_F) = 29,6 - 185,5(\omega_F) + 655,7(\omega_F)^2 - 1017(\omega_F)^3 + 638,9(\omega_F)^4, \quad (2)$$

а t_0, B - номинальные размеры опасного сечения образца до испытания (см. фиг. 1).

В случае упругопластического деформирования, когда пластическая зона у вершины трещины достигает значительных размеров, условную предельную величину коэффициента интенсивности напряжений K_Q (при вычислении с учетом поправки на пластичность обозначается K_{Ic}^F), соответствующую предельной нагрузке P_Q , определяемой по ГОСТу 25.506-85 [1] методом секущей (прямая наклонная линия на диаграмме "нагрузка P - перемещение V берегов трещины", фиг. 3), принимают равной вязкости разрушения при статическом нагружении K_{Ic} , если выполняются условия плоской деформации.

По полученным значениям коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic}^F и утяжки (уширения) ϕ образца строят D- и (или) Q-диаграммы СУПРОТ (фиг. 5). Если при расчете величины K_{Ic}^F условно принимают, что нагрузка в процессе долома, достигнув максимального значения, остается постоянной (это реализуется, когда испытательная машина достаточно жесткая или скорость нагружения высока), то получают диаграмму OBCS (см. фиг. 5), которая с учетом оси ординат напоминает латинскую букву D, поэтому ее называют D-диаграммой. Если же при расчете K_{Ic}^F учитывают падение нагрузки в ходе долома образца (когда машина имеет относительно невысокую жесткость или скорость нагружения низка), то получают диаграмму OBC₁S₁ (см. фиг. 5). Поскольку форма этой диаграммы напоминает латинскую бук-

ву Q, ее называют Q-диаграммой.

Диаграмма СУПРОТ в общем случае состоит из двух кривых: кривой упругопластического разрушения (участки ОВС на D-диаграмме и ОВС₁ на Q-диаграмме) и кривой квазистатического долома (участки CS на D-диаграмме и C₁S₁ на Q-диаграмме). В соответствующих точках C и C₁ трещина достигает критического размера l_c, которому отвечает предельная утяжка φ_c и предельное значение КИН - статическая вязкость разрушения (величина K_c^F на D-диаграмме и K_c^{*} на Q-диаграмме). В соответствующих точках S и S₁ происходит разделение образца на две части, при этом имеет место максимальное уширение φ_s его опасного сечения, по которому определяют другое предельное значение КИН - квазистатическую вязкость разрушения (величина K_{sc}^{*} на D-диаграмме; на Q-диаграмме K_{I=0}^F в этой точке). Пересечение кривой CS с осью ординат дает еще один параметр трещиностойкости K₀^{*} (см. фиг. 5). Максимум Q-диаграммы по оси КИН (точка В) соответствует максимальной нагрузке P_{max}=P_c (см. фиг. 3) и характеризуется физическим параметром K_{max}^F, которому соответствует утяжка φ_{Pmax}.

В конечном счете, предлагаемый способ позволяет определять экспериментально ряд силовых (K_c^F, K_c^{*}, K_{sc}^{*}, K_{max}^F, K₀^{*}) и деформационных (φ_c, φ_{Pmax}, φ_s) характеристик трещиностойкости материалов при статическом упругопластическом деформировании.

Пример реализации способа.

Испытания проводились на сервогидравлической испытательной машине Vi-01-102 в соответствии со схемой, приведенной на фиг. 1. Компактный образец (толщиной t₀=11,5 мм, размеры В=28 мм, Н=33,6 мм - см. фиг. 1) для испытаний вырезали из трубы диаметром 820 линейной части нефтепровода (материал - низколегированная сталь 17Г1С) с ориентацией надреза и фронта развития усталостной трещины в осевом направлении трубы (фиг. 2). Предварительно в образце производили выращивание начальной трещины от надреза при циклическом нагружении, коэффициенте асимметрии цикла R=0,1. Далее осуществляли статическое нагружение образца по [1] до разрушения с построением диаграммы "нагрузка P - перемещение V берегов трещины" (фиг. 3), измеряли утяжку (уширение) φ образца и по полученным в результате испытания значениям нагрузки длины трещины и с учетом пластической деформации (утяжки) опасного сечения образца рассчитывали величину коэффициента интенсивности напряжений по формуле (1). Затем построили и Q-диаграмму СУПРОТ (фиг. 6) для данного образца. По экспериментальной диаграмме "нагрузка - перемещение берегов трещины по линии действия силы" (фиг. 3) определили методом секущей нагрузку P_Q=7,8 кН, а также максимальную нагрузку P_{max}, которую выдержал образец при доломе (для данного образца P_{max}=13,3 кН). Вязкость разрушения K_{Ic} по ГОСТу 25.506-85 для исследуемой стали не может быть определена ввиду того, что не выполнялось условие плоской деформации по [1]. Однако условная оценка предельной величины коэффициента интенсивности напряжений, соответствующая предельной нагрузке P_Q, может быть дана; она составила для данного образца K_Q^F=39,9 МПа√м.

С помощью Q-диаграммы СУПРОТ были определены следующие значения основных силовых и деформационных характеристик статической трещиностойкости компактного образца из стали 17Г1С: K_c^{*}=36 МПаТ√м; K_{max}^F=48 МПа√м; φ_c=1,45 мм; φ_{Pmax}=1,20 мм; φ_s=-0,75 мм.

Таким образом, заявляемый способ по сравнению с прототипом позволяет применить при испытаниях на трещиностойкость компактный образец - элемент трубы большого (более 400 мм) диаметра, сохраняющий геометрию трубы линейной части трубопровода и ее пластические свойства (при этом толщина t₀ образца численно равна толщине стенки трубы), и использовать при оценке коэффициента интенсивности напряжений в образце с трещиной свойство окружающей вершину трещины пластической зоны поглощать энергию в процессе развития трещины, и, таким образом, оказывать влияние на сопротивление материала росту трещины в условиях упругопластического деформирования, что позволило использовать параметр механики разрушения - коэффициент интенсивности напряжений, а также деформационный параметр - утяжку образца в плоскости его излома - для определения ряда силовых и деформационных характеристик трещиностойкости материала при упругопластическом деформировании.

Источники информации.

1. ГОСТ 25.506-85. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. - Введ. 01.01.86. - с. 3-12.
2. Авторское свидетельство СССР № 1820278, G01N 3/00, 07.06.1993, Бюл. № 21.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ определения характеристик трещиностойкости материалов при статическом упругопластическом деформировании, заключающийся в том, что образец с надрезом и предварительно выращенной усталостной трещиной подвергают статическому внецентренному растяжению до разрушения с заданной скоростью нагружения, непрерывно измеряя нагрузку в образце и перемещение берегов трещины, определяют момент страгивания трещины и нагрузку в этот момент, которую используют для определения параметров трещиностойкости, отличающийся тем, что измеряют утяжку образца - элемента трубы, сохраняющего геометрию, толщину стенки трубы диаметром более 400 мм и ее пластические свойства, в плоскости его излома, коэффициент интенсивности напряжений вычисляют по формуле, учитывающей

действительную площадь сечения образца в плоскости излома:

$$K_I^F = \frac{P}{t_0 \sqrt{B}} \omega_F^{1/2} Y(\omega_F),$$

где $\omega = F_1/F_0$ - локальная мера поврежденности образца с трещиной;

F_0 - площадь сечения образца в плоскости излома до испытаний;

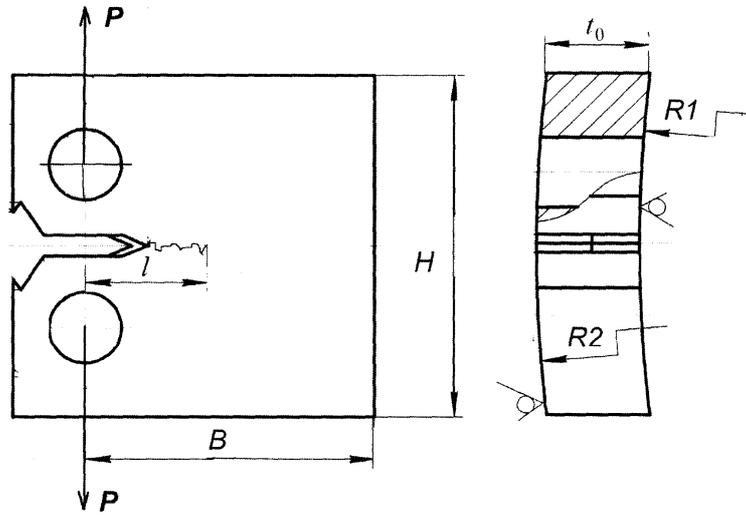
F_1 - фактическая площадь сечения образца в плоскости излома, поврежденная трещиной длиной l , определяемая с учетом пластической деформации сечения;

$Y(\omega_F)$ - поправочная функция, определяемая с учетом пластической деформации по формуле:

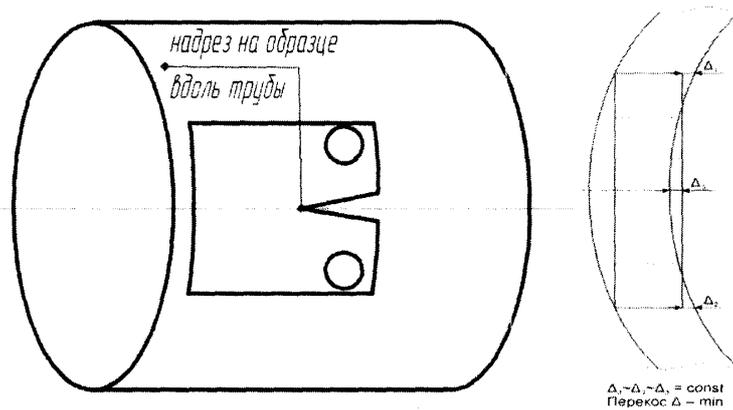
$$Y(\omega_F) = 29,6 - 185,5(\omega_F) + 655,7(\omega_F)^2 - 1017(\omega_F)^3 + 638,9(\omega_F)^4;$$

t_0, B - номинальные размеры сечения образца в плоскости излома до испытания,

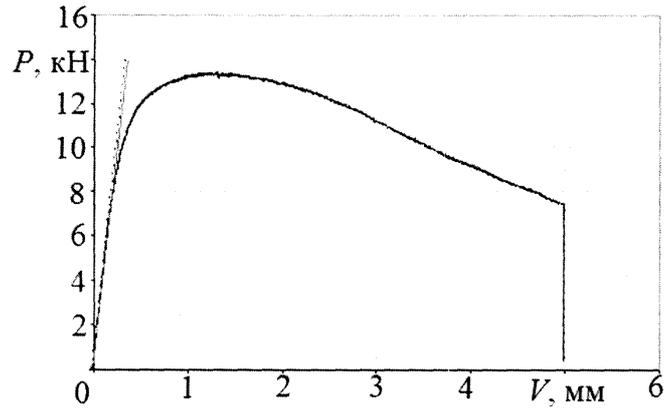
производят построение диаграммы статического упругопластического разрушения образца с трещиной в координатах "коэффициент интенсивности напряжений, вычисленный с учетом поправки на пластичность - утяжка образца", и с помощью диаграмм "нагрузка - перемещение" и статического упругопластического разрушения образца с трещиной определяют ряд новых силовых $K_{sc}^F, K_{sc}^*, K_{sc}^*, K_{sc}^*, K_0^F$ и деформационных $\varphi_c, \varphi_{pmax}, \varphi_s$ характеристик, а также уточняют значение известной K_Q^F характеристики статической трещиностойкости.



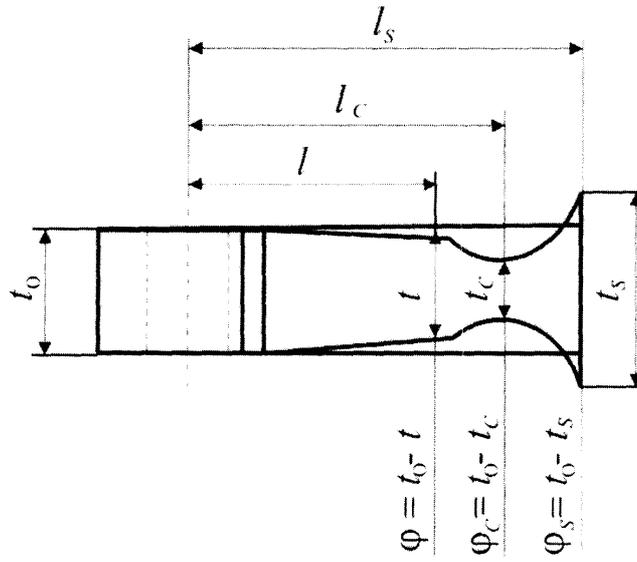
Фиг. 1



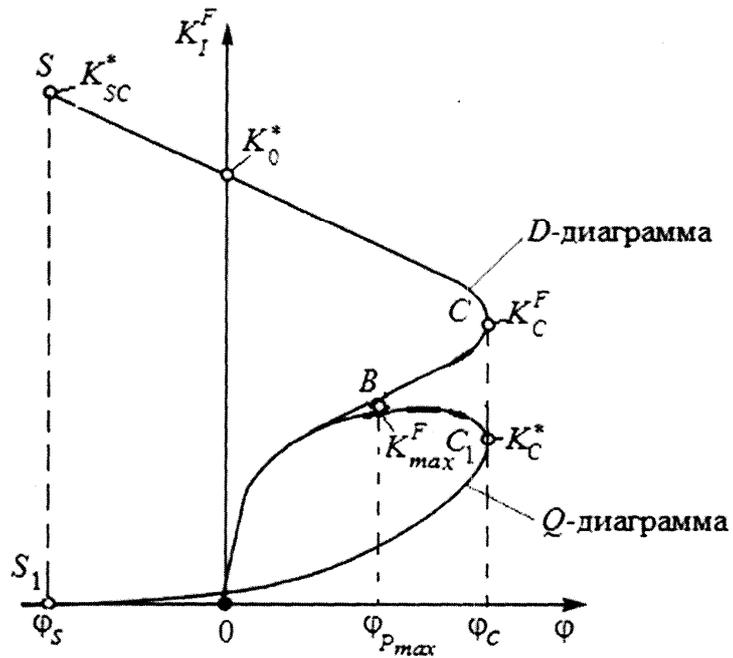
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

