Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

СИМОНОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

Динамическая трещиностойкость и ее взаимосвязь с характеристиками изломов закаленных и отпущенных конструкционных сталей

05.16.09 – Материаловедение (металлургия)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Ханов Алмаз Муллаянович

Пермь – 2017

2

Оглавление

Введение………………………………………………………………………………………………...5

Глава 1. Аналитический обзор литературных источников……………………………………..….10

1.1. Трещиностойкость металлических материалов. Выбор критериев для оценки

динамической трещиностойкости…………………………………………………………………...10

1.1.1. Классификация критериев трещиностойкости…………………………...……...…….11

1.1.2. Критерии статической трещиностойкости………………………………… ……12

1.1.3. Критерии динамической трещиностойкости………………………………...……….14

1.1.4. Анализ способов, обеспечивающих получение плоскодеформированного состояния при динамических испытаниях………………………………………… …….17

1.2. Фрактография как средство оценки уровня трещиностойкости металлических

материалов…………………………………………………………………………………………….19

1.3. Пластические зоны и локальное напряженное состояние у вершины

трещины…………………………………………………………………………………….…………22

1.3.1. Зона пластической деформации (ЗПД) у вершины трещины. Размер

ЗПД…… ………………………..…..22

1.3.2. Форма зон пластической деформаци ……………………………………..……23

1.4. Современные представления о процессе пластической деформации при

высокоскоростном нагружении……………………………………………...………………………27

1.5. Постановка цели и задач исследования………………………………………………...……31

Глава 2. Материалы и методики исследования………………………………………….………….34

2.1. Материалы для исследования…………………………………………………………...……34

2.2. Методика термической обработки………………………...…………………………...…….34

2.3 Методика оценки твердости…………………………………………...……………….……..35

2.4 Методика металлографических исследований на электронном микроскопе,

количественный анализ карбидной фазы……………………………………………...……………35

3

2.5. Методика электроннофрактографических исследований, количественный анализ

элементов поверхности разрушения……………………………………………………...…………35

2.6. Методика оценки характеристик прочности и пластичности………………………...……36

2.7. Методика оценки ударной вязкости…………………………………………...…………….36

2.8. Разработка методики оценки параметров динамической трещиностойкости по

результатам ударных испытаний на маятниковом копре…………………………..……….……..37

2.9. Методика оценки микротвердости…………………………………………..………………40

2.10. Разработка методики оценки размера зоны пластической деформации после испытаний образцов на динамическую трещиностойкость……………………………….……………………41

2.11. Выводы по Главе 2………………………………………………………………...………...46 Глава 3. Апробация разработанной методики оценки динамической трещиностойкости……....47

3.1. Паспортизация сталей, используемых для апробации методики оценки динамической трещиностойкости………………………………………………………………………………….…47

3.2. Построение диаграмм динамической трещиностойкости закаленных и отпущенных конструкционных сталей с различным содержанием углерода……………………….…………..55

3.2.1. Ударная вязкость исследуемых сталей на образцах с трещиной различной длины без боковых надрезов…………………………………………………………………………………..…55

3.2.2. Исследование ударной вязкости конструкционных сталей на образцах с трещиной различной длины и двумя дополнительными боковыми надрезами………………………...……61

3.2.3. Построение диаграмм динамической трещиностойкости (ДДТ) закаленных и

отпущенных конструкционных сталей………………………………………….….……………….64

3.2.4. Некоторые особенности построения ДДТ……………………………………...…..…..69

3.3. Выводы по главе 3…………………………………………………...………………...……...70

Глава 4. Исследование размерных параметров элементов рельефа поверхности разрушения конструкционных сталей. Установление взаимосвязи динамической трещиностойкости с параметрами изломов конструкционных сталей……………………………………………...…….72

4

4.1. Исследование микромеханизмов роста трещины в сталях 09Г2С, 25 и 40 при динамических испытаниях………………………………………………………………………………………...….72

4.2. Исследование геометрических размеров ямок стали 09Г2С в высоковязком состоянии в стартовой области динамической трещины…………………………………….…………………..86

4.3. Выводы по главе 4………………………………………………………………………………..94

Глава 5. Исследование параметров зон пластической деформации при динамических испытаниях конструкционных сталей 09Г2С, 25 и 40 в различном структурном состоянии…...96

5.1. Исследование формы и размеров ЗПД сталей 09Г2С, 25 и 40……………………………..…96

5.2. Исследование распределения микротвердости в объеме ЗПД под всей траекторией движения динамической трещины от старта до выбега на поверхность материал-торец образца. О характере неоднородности пластической деформации в объеме ЗПД…………………..……112

5.3. Структурные особенности зон пластической деформации конструкционных сталей в высоковязком состоянии………………………………………………………………………..…..122

5.4. Выводы по главе 5………………………………………………………………………………138

Глава 6. Разработка и апробация методики прогнозирования уровня механических свойств конструкционных сталей в высоковязком состоянии…………………………………….………140

Заключение. Общие выводы………………………………………..………………………………154

Список литературы……………………………………………………………….…………………157

Приложение 1. Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в образовательный процесс…………………………………………………………………..……….170

Приложение 2. Акт использования (внедрения) результатов диссертационной работы в НИР…………………………………………………………………………..……………………….172

Общиевыводы

 РазработанаметодикаоценкидинамическойтрещиностойкостизакаленныхиотпущенныхконструкционныхсталейвключающаяпроведениеиспытанийнаударныйизгибобразцовсусталостнойтрещинойразличнойдлиныатакжеобразцовстрещинойидвумядополнительнымибоковымиобразныминадрезамиспоследующимпостроениемзависимостейКСТ–λдляобеихгруппобразцовнаодномкоординатномполе

 РазработанаметодикаопределенияразмераиформыЗПДпорезультатамсистематическогоизмерениямикротвердостикотораязаключаетсявпостроениикартраспределениямикротвердостивЗПД

 ПаспортизациявыбранныхдляисследованиясталейсталиГСипоказалачтоврезультатезакалкииотпускавширокомдиапазонетемпературвнихформируютсяизвестныеструктурыотмартенситаотпускавнизкоотпущенномсостоянииотпускпри°СдосмесидисперсногосорбитаотпускаисорбитаотпускаТвердостьатакже–прочностьипластичностьисследуемыхсталейврезультатетермическойобработкиизменяютсятрадиционнотвердостьихарактеристикипрочностипадаютапоказателипластичностирастут

 ПоказаночтоввысоковязкихсостоянияхсстальГСотпускиотдо°Сстальотпускии°Сстальотпуск°СпомереувеличениядлинытрещиныудельнаяработараспространениятрещиныснижаетсяихарактерэтогосниженияможноаппроксимироватьлинейнойзависимостьюВнекоторыхслучаяхназависимостяхКСТ–λвследзалинейнониспадающимучасткомпоявляетсягоризонтальныйучастокстальотпуск°Сстальотпуск°СДляконструкционныхсталейвхрупкомсостояниистальотпуск°Сстальотпуски°СуровеньКСТнезависитотдлинытрещиныитогдазависимостьКСТ–λпредставляетсобойгоризонтальспостояннымуровнемКСТ

ПоказаночтоприналичиибоковыхнадрезовуровеньударнойвязкостипостояненинезависитотдлинытрещиныбоковаяутяжканаобразцахотсутствуетЗначениеКСТКСТвтакихслучаяхпредставляетсобойудельнуюработураспространениятрещиныприударномизгибевусловияхмаксимальноприближенныхкплоскойдеформации

ПостроеныдиаграммыдинамическойтрещиностойкостиДДТдлясталейГСииопределеныпараметрыдинамическойтрещиностойкостиКСТλПоказаночтопомерепостепенногопревращенияструктурымартенситаотпускавсорбитотпускахарактеристикиДТисследуемыхсталейрастутпричемэтотросттемзаметнеечемнижесодержаниевсталиуглерода





 Проведенкачественныйиколичественныйанализизломовполученныхврезультате

ударныхиспытанийзакаленныхиотпущенныхсталейГСиПоказаночтовстали

ГСвязкиймеханизмростатрещиныдоминируетвовсемдиапазонетемпературотпускав

сталипосленизкогоотпускадоминирующимявляетсяквазисколавязкиймеханизм

становитсядоминирующимтолькопослеотпускапри°Свсталивязкиймеханизм

доминируеттолькопослеотпускапри°С

ПоказаночтоямкиформирующиесявсталяхприразныхтемпературахотпускаимеютразнуюморфологиюиразмерыУстановленыразмерныепараметрыямокформирующихсявсталяхприразныхтемпературахотпускавцентральнойобластиизломовпоказаночтосредниеимаксимальныедиаметральныеразмерыуплощенныхямокконусовиямоктоннелейувеличиваютсяпомереповышениятемпературыотпуска

ПредложенаклассификацияямоквосновукоторойположеносоотношениедиаметральногоивысотногоразмероввключающаяямкиконусыуплощенныеямкиконусыямкитоннелиимикроямкиПоказаночтодиаметральныйразмероднотипныхямоквстартовойобластисущественноменьшечемвцентральнойобластиповерхностиразрушения

 Спомощьюразработаннойметодикисистематическогоизмерениямикротвердости

определеныформаиразмерызонпластическойдеформацииформирующихсявстартовых

областяхизломовпридинамическихиспытанияхисследуемыхсталейПоказаночторазмер

ЗПДпомереповышениятемпературыотпускавсехисследованныхсталейувеличиваетсяас

повышениемсодержанияуглеродавсталиприданнойтемпературеотпусканаблюдается

уменьшениеразмераЗПДвстартовыхобластяхПоказаночтопомереповышения

сопротивленияпластическойдеформацииформаЗПДвстартовойобластистановитсявсеболее

плоскойакрометогонаблюдаетсясмещениеЗПДвсторонустартадинамическойтрещины

УстановленочтоосновнойпараметрДТКСТдлявсехисследованныхсталейввязкомсостояниилинейнорастетпомереувеличенияразмераЗПДвстартовойобласти

 ВыявленнемонотонныйхарактеризменениямикротвердостивобъемеЗПДв

стартовойобластииядреЗПДвыявленоприсутствиеобластейрелаксациииобластейс

максимальнымуровнеммикротвердостивмезообъемахобластидоломаудаленныхот

поверхностиразрушения

 Установленочтопроведениеиспытанийсоскоростьюнагружениямсприводит

креализацииэффектаадиабатическогосдвигавобъемахструктурыприближенныхк

поверхностиразрушениявстартовойобластиусталейГСиатакжеувсехтрехсталейв

областисиловоговоздействияпослепроведениязакалкиивысокогоотпускапри°СЭтот

эффектпроявляетсявобразованииполосовойструктурывкоторойкарбидырасполагаютсяпо

границамвытянутыхструктурныхэлементов





Количественнымиисследованиямидолииэлементногосоставакарбидовпоказаночтопридинамическихиспытанияхвполосахадиабатическогосдвигареализуетсягидродинамическиймассопереносвпроцессекоторогопроисходитобеднениепоуглеродуструктурныхобъемовприлежащихкместуударамолотакопраиобогащениеболееудаленныхобъемоввполосахадиабатическогосдвига

НаосновеполученныхвработеданныховзаимосвязиДТсхарактеристикамиизломовразработанамодельпозволяющаяпрогнозироватьуровеньпрочностипластичностидинамическойтрещиностойкостиидругихпараметровисследованныхсталейПроверкаработоспособностиразработанноймоделипроведеннаянапримеретрубнойзаготовкиизтермоулучшеннойсталиГСпоказалавполнеудовлетворительноесоответствиерасчетныхиэкспериментальныхрезультатов