

화염경화법으로 표면경화 된 저압부 터빈재료의 액적충격침식특성

Liquid Impact Erosion Characteristics of Superficially Hardened Low Pressure Turbine Blade Material by Flame Hardening

김경호, 김광호*, 이민구, 이창규, 위명용**, 김홍희

한국원자력연구소

*충남대학교 재료공학과

**충북대학교 공과대학 재료공학과

요 약

본 연구에서는 공정이 단순하고, 대면적 부품에 적용이 가능하며, 취약한 계면이 형성되지 않는 화염경화법을 시험온도와 냉각제를 변수로 하여 최적조건을 도출하고, 터빈 블레이드 재료인 12Cr steel(12Cr, 0.3Mn, 0.1C, bal.Fe)의 표면을 강화시킴으로써 침식저항성을 향상시키고자 하였다. 침식시험은 최대물방울 분사속도가 600m/s인 액상충격침식장치로 시험하였고, 광학현미경과 전자주사현미경을 이용하여 침식깊이를 측정하고, 전자저울로 질량감소량을 측정하여 침식저항성을 분석하였다. 표면처리 된 12Cr steel의 경도는 시편의 표면온도가 약 900℃ 이하에서는 경화가 거의 일어나지 않았으며, 오스테나이트 영역인 1000℃ 이상에서 표면처리 된 시편들은 마르텐사이트 변태에 의해 경화가 일어났음이 관찰되었다. 경화층 표면의 경도는 as-received 시편(300 KHN)에 비해 2배 가까이 증가한 500~600 KHN의 값을 나타냈다. 이러한 현상은 X-선 회절 분석결과 화염공정온도가 증가함에 따라 peak-broadening 및 격자팽창(d110의 경우 0.69%)을 나타냈는데, 시편 내부의 불균일 변형량 및 Fe 기지내로의 carbon 고용량이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

Abstract

To improve liquid impact erosion resistance by strengthening the surface of 12Cr steel(12Cr, 0.3Mn, 0.1C, bal. Fe) which is currently used as steam turbine blade material, flame hardening method which is simple process, without having interface, possible to apply to large surface area has been studied to find its optimal condition as a function of flame temperature and cooling conditions. Erosion test is conducted for flame hardened material with maximum water jet speed of about 600m/s by using liquid impact erosion tester. Erosion resistance is analysed by optical and scanning electron microscopes to measure the depth of eroded specimens and its decreased mass. Degree of the surface hardened 12Cr steel was not observed below specimen's surface temperature of 900℃, whereas hardening is observed by martensite transformation above 1,000℃ in austenite

region. The surface hardness in hardened layer of 12Cr steel is about two times higher than that of as-received specimen(300KHN). This phenomena would be due to the non-uniformed strain and the increasing of carbon solid solution in the specimen. The result of X-ray diffraction pattern analysis showed that peak-broadening and lattice expansion is occurred with increasing of flame hardening temperature.

1. 서 론

지난 수 십년 동안 원자력발전소의 수명연장과 건전성 및 성능 향상을 확보하기 위한 노력의 일환으로 표면처리기술을 이용하여 성능향상을 시키고, 이에 따른 동적 손상 평가 기술을 개발하여 재료 수명을 연장을 꾀하려는 많은 연구가 진행되고 있다^(1~5). 국내의 경우 130여건의 동익 사고 중 터빈 최종단의 사고가 전체사고의 약 90% 정도를 차지하였고, 발전소 운전정지로 인한 막대한 경제적 손실을 가져왔다. 원자력발전소의 터빈 블레이드의 손상은 주로 스팀 내에 존재하는 습분이 블레이드와 충돌로 인하여 발생하는 침식에 의한다. 특히 LP(low pressure) 부(section)에서는 HP(high pressure) 부로부터 나온 스팀이 LP 부으로 들어갈 때 단열팽창을 하게 되고 포화응결 조건보다도 낮은 온도에서 응결이 일어나기 때문에 터빈 내에서 가장 많은 습분을 형성하게 된다. 이러한 습분은 블레이드와 맞물려있는 안내 깃(guide vane)과 고정자(stator)를 통과하면서 수십 μm ~수백 μm 의 두께로 적층되며 그 위의 증기흐름에 따라 다시 그 크기가 큰 습분으로 합쳐져 이동 블레이드와 충돌하게 된다. 충격속도가 큰 습분이 재료에 연속 또는 불연속적인 충격을 가할 때 재료에 계속해서 접촉압력을 발생시키고 이 접촉압력은 물의 정상흐름에서 보다 훨씬 높은 값을 갖는데 보통은 재료의 내구력 한계나 항복강도보다 크다. 유체에 의한 재료 침식의 파손형태는 톱니 같이 날카로운 표면을 갖게 되는데, 원전 터빈의 LP 최종단 블레이드의 침식 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 이러한 현상을 방지하기 위한 노력에는 블레이드의 설계관점과 재료적인 관점으로 분류할 수 있다. 우선 설계관점에서는 stator의 표면 위에 적층되어 있는 습분을 흡인이나 배액 장치를 설치함으로써 제거한다거나, 습분이 모여있는 표면을 불어 날려버리거나 stator와 이동 블레이드 사이의 간격을 넓혀 습분의 이동 경로를 길게 함으로써 미세한 물방울들로 분산시키는 방법 등이 연구되어 왔다^(5~8). 재료 적인 관점에서는 침식이 가장 심하게 일어나는 leading edge 부분을 좀 더 강한 재료로 보호하는 방법 즉 flame hardening, TiN coating, plasma spray 방법들이 1920년대 이후로 계속 연구되고 있는데, 특히 Baker등은 cobalt-base 합금인 Stellite를 leading edge에 brazing하였을 경우 침식에 대한 저항성이 가장 우수하였다고 보고하였다⁽⁹⁾. 그러나 Stellite는 전략물질이고 고가이면서 방사화가 되기 쉬운 Co가 많이 함유되어 있어 방사선 저감 및 안전 측면에서는 매력적이지 못하며, 구입이 용이하지 않고 초기 제작비가 비쌀 뿐만 아니라 사용 중에 계속 보수를 해야 하기 때문에 보수 유지비가 많이 소요된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 무엇보다도 블레이드의 침식에

대한 저항성을 향상시키기 위한 적합한 표면처리공정이 확보되어야 하며, 현재 사용하고 있는 블레이드 재료들의 침식기구가 먼저 규명되어야 하지만 이에 관한 연구는 아직 충분치 못한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 블레이드의 재료로 사용되는 12Cr steel(12Cr, 0.3Mn, 0.1C, bal.Fe)을 가지고 공정이 단순하고, 대면적 부품과 선택적 부분에 표면경화처리가 가능하며, 취약한 계면이 형성되지 않는 화염경화법에 대한 공정변수 중 화염온도와 냉각제를 변수로 하여 최적조건을 도출하고, 표면처리 된 12Cr steel에 대한 액적충격 침식시험을 실시함으로써 침식기구를 규명하여 침식저항성을 향상시키고자 하였다.

2. 실험방법

2-1 시편준비(Specimen preparation)

침식 시험을 위해 준비한 시편은 원자력 LP 터빈 블레이드 재료인 12Cr steel 이다. 12Cr steel의 물리적 성질과 기계적 성질을 table 1에 나타내었다. 시험편의 크기는 10 x 10 x 20 mm로 밀링 가공을 한 후 1 μm Al_2O_3 powder로 연마하였고, 시험편의 표면에 부착되어 있는 이물질을 제거하기 위하여 아세톤 용액에서 20분간 초음파 세척을 실시하였다.

2-2 화염경화처리(flame hardening treatment)

본 실험에 이용된 화염경화장치를 Fig.2에 나타내었다. 화염경화처리는 가연성 가스인 아세틸렌, 천연가스, LPG, 프로판과 산소의 혼합가스에 의한 고온화염을 이용하여 강의 표면을 급속히 가열하여 표면 층이 오스테나이트화 되었을 때 급랭하여 표면 층을 마르텐사이트 조직으로 변화시켜 경화처리 하는 것을 말하는데, 화염경화의 특성은 가스의 유동속도(gas flow rate), 가스의 순도(gas quality), 불꽃온도(set temperature), 가열시간(flame hardening time), 화염의 이동속도(flame moving speed)와 냉각방법(quenching method)에 따라 달라진다. 따라서 본 화염경화장치는 위와 같은 변수(process parameter)를 조정할 수 있게 설계/제작하였다. 본 실험에 사용된 화염원은 아세틸렌, LPG와 산소의 혼합가스를 이용하였고, 화염의 직경은 약 10cm가 되도록 하여 스텝핑 모터 구동장치에 토치를 고정하고 화염이동속도를 일정하게 유지하여 균일한 화염경화처리가 되도록 하였다. 화염경화온도변화 따른 표면 층의 미세구조와 표면경도를 알아보기 위하여 불꽃온도는 645 $^{\circ}\text{C}$ ~ 1,270 $^{\circ}\text{C}$ 까지 6 단계로 분리하여 화염경화처리를 실시하였으며, 목적온도에서의 타깃의 표면온도는 적외선 파이로미터(infrared ray pyrometer)를 이용하여 측정하였다. 또한 냉각방법에 따른 시험편의 표면경도를 조사하기 위하여 다섯 가지의 냉각제 즉 공기중, 물, 소금물, 오일, 액체질소를 사용하여 냉각하였다.

2-3 액상충격침식시험(liquid impact erosion test)

현재 세계적으로 사용되는 침식 장치의 종류에는 Whirl arm type (미국, Bell aerospace company⁽¹¹⁾)과 Disk rotary type (영국 Cambridge 대학, 프랑스, 체코 등이 있다^(12,13)). Whirl arm type 또는 disk rotary type은 300 m/s 이상의 물방울 입사 속도는 얻을 수 없을 뿐 아니라 설사 300 m/s 이상의 속도를 얻는다 하더라도 air shock이 발생할 가능성이 있다. 또한 시험편을 disk에 장착하였을 때 균형유지의 문제로 인해 진동의 소지가 있으며 소음이 매우 심하다. 따라서 본 연구에서는 물방울의 속도에 따라 침식률을 결정할 수 있고, single impact 및 multi impacts를 자유롭게 조절할 수 있는 침식 장치를 설계 제작하였다. 본 연구에 사용한 액적충격침식장치를 Fig. 3에 나타내었다. Air reservoir내의 대기압 이상 (본 연구에서는 1.4 bar 이상)으로 압축된 공기는 nylon piston 상하에 발생된 압력차이에 의해 nylon piston을 하강시킨다. 이 때 Nylon piston은 T-piston을 치게 되고, T-piston은 nozzle내의 물을 치면서 물을 내보낸다. Nozzle내의 물은 연동 펌프 (peristaltic pump)에 의해 일정량이 연속적으로 공급되도록 하였다. Nozzle내 물이 일정량 이상이 되면 진공 펌프에 의해 연속적으로 뽑히도록 하여 nozzle내에는 물이 항상 일정량을 유지하도록 하였다. 또한 nozzle내 물의 안정화를 위하여 water line으로부터 2 mm 상부에 모든 동작은 연속적인 동작으로 이루어졌고 컴퓨터로 제어하였다. 물의 속도는 nozzle 바로 밑에 설치된 속도측정계에 의해 측정되었다. 물 제트의 속도는 1초에 20,000frame 까지 촬영이 가능한 고속카메라에 의해 이루어 졌고, 이 때의 최대 물 제트 속도는 약 600m/s이었다. 침식시험 시 nozzle 직경과 길이는 각각 0.6 mm, 3 mm 이었고 nozzle-to-specimen 간격은 10 mm 이고, impact angle은 90° 로 일정하게 하였으며 nozzle을 통해 나오는 물의 양은 약 0.15 cc를 유지하도록 하였다. 침식시험 분위기는 대기 상태였고 온도는 상온이었다.

2-4 미세조직 관찰 및 경도측정

침식시험 후의 시험편의 침식 정도를 알아보기 위해 광학 현미경을 이용하여 초점면의 위치를 변화시켜 침식 깊이를 측정하였다. 침식된 표면과 단면 형상 관찰은 광학 현미경과 주사 전자 현미경(SEM)을 이용하였다. 에칭은 picnic acid 4g, etanol 96ml, HCl 3ml로 혼합한 용액을 사용하였다. 각각의 시험편의 표면 층과 단면 층의 경도는 micro-knoop hardness tester를 이용하여 측정하였다. 이 때에 작용하중은 1.91N으로 하였고 모든 시험편에 대해 10회씩 경도를 측정한 후 각 측정치의 평균값으로 경도를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 화염온도에 따른 표면 층의 경화 특성

Fig.4는 12Cr steel의 표면온도의 변화에 따른 경도 변화를 보여준다. 약 900°C 이하의 온도에서는 경화가 거의 일어나지 않았으며, 1000°C 이상에서부터 경화가 일어났음을 보여 준다. 이때 표면에 가까운 경도 값은 약 500~600 KHN의 값을 나타냈다. 이러한 온도범위는 현재 미국의 GE power generation engineering에서 규격화되어있는 온도범위 (982°C~1150°C)와 거의 유사하다. 또한 1000°C 이상으로 온도가 더욱 증가하면 경화 층의 깊이는 더욱 증가하여 1000°C의 경우 경화 깊이는 약 8~10mm이었으나 1120°C의 경우 18mm이상으로 증가함을 볼 수 있다.

3-2 표면으로부터의 경화깊이에 따른 경도특성과 미세조직

Fig. 5는 표면온도 1000°C에서 화염경화 된 12Cr steel의 표면으로부터의 깊이에 따른 경도 값을 나타낸다. As-received 12Cr steel의 경도는 약 290~310 KHN의 값을 가지는데 경화깊이 약 10mm에서의 경도 값과 일치하였다. 따라서 본 실험조건인 화염경화로 인한 표면경화 층의 최대깊이를 알 수 있었으며, 표면으로부터의 깊이가 깊어짐에 따라 상대적으로 경도 값은 낮았다. Fig. 6은 1000°C에서 화염경화된 12Cr steel의 경화 깊이에서의 단면조직 사진을 보여 준다. 표면에서 가까운 경화 층의 조직은 전형적인 metastable한 마르텐사이트 변태에 의한 조직임을 알 수 있다. 경화가 일어나지 않은 깊이가 8mm에서 관찰된 조직은 전형적인 as-received 시편 조직을 보여주었다. 이러한 마르텐사이트(martensite) 조직은 이론적으로 약 950°C 이상의 오스테나이트(austenite) 조직이 급냉되면서 얻어지는 조직으로서 본 연구에서 경화가 일어난 공정 온도 범위와 유사함을 알 수 있다.

3-3 화염경화 된 12Cr steel의 X-ray diffraction에 의한 미세조직 연구

12Cr steel을 오스테나이트 영역에서 급냉을 하게 되면 상온에서 마르텐사이트 조직을 얻게 됨을 조직사진을 통해 관찰할 수 있었다. 이때의 조직은 metastable한 조직으로서 불균일 변형에 의해 많은 내부 strain을 갖게 될 것이다. 또한 위의 경도 시험 결과가 보여 주듯이 경도의 증가는 오스테나이트 영역에서 표면처리 후 급냉시 탄화물로부터 Fe 또는 Fe-Cr 기지로의 탄소의 고용에 의한 탄소 고용강화에 의한 것으로 판단되며 이때 경도 값은 탄소의 고용량과 관계될 것으로 판단된다. 이러한 경화층 내부의 미세 조직에 대한 구체적 정보를 얻기 위해 온도에 따라 화염경화된 12Cr steel의 x-ray normal $\theta-2\theta$ diffraction patterns을 분석하였다(Fig. 7). 측정 조건은 tube power가 40kV, 30mA, step은 0.02°, 0.01°, 그리고 scan speed는 2°/min., 0.5°/min.이었으며 Cu $K\alpha$ radiation이 이용되었다. 20° ~ 80° 의 구간에서는 전형적

으로 bcc구조의 (110)와 (200) peak들이 관찰되었고, 미세조직의 관찰에는 intensity가 큰 (110) peak이 이용되었다. Fig. 7은 normal $\theta-2\theta$ pattern들은 공정온도에 따라 측정된 (110) peak들을 보여준다. 공정온도가 증가함에 따라 (110) peak의 intensity는 감소하였고, (110) peak의 broadening이 관찰되었다. 이는 급냉에 의한 불규일 변형, 즉 mosaic spread에 의한 것으로 판단되며 측정된 반가폭(FWHM)은 as-received인 경우 angular width가 약 0.30이었으나, 공정온도가 1270°C인 경우 약 0.60으로 증가하였다. 실제로 위의 미세조직 사진에서도 보여주듯이 이러한 심한 내부 변형은 명확한 입계나 석출물을 갖는 as-received 조직에 비해 본 연구에 있어서 에칭(etching)의 어려움을 초래하였다. 또한 (110) peak의 위치는 as-received 조직인 경우 $2\theta=44.53^\circ$ 에서 관찰되었으나, 공정온도가 증가함에 따라 점차 왼쪽으로 이동하여 1270°C인 경우 (110)의 2θ 위치는 44.20° 이었다. 각각의 경우에 해당하는 d110는 2.035Å, 2.049Å로서 이는 탄소의 침입형 고용에 의한 격자(lattice)의 팽창을 의미한다. 특히 온도 증가에 따라 Fe lattice내로의 탄소의 고용량이 증가하여 Fe lattice가 팽창하였을 것으로 판단되며, 1270°C에서 화염경화된 12Cr steel의 경우 탄소 고용에 의한 변형량(strain)은 약 0.70 %로 측정되었다.

3-4 화염경화온도와 충격횟수에 따른 손상면 관찰

Fig. 8은 as-received 12Cr steel과 화염경화 온도 700°C, 1000°C에서 표면경화 된 시험편에 대한 충격횟수에 대한 손상정도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 충격횟수가 증가함에 따라 이러한 hollow의 밀도가 증가하였고, 계속되는 충격은 hollows의 겹침 현상을 초래하여 연속적인 굴곡을 갖는 표면을 발생시켰다. 충격 횟수가 더욱 증가하면 surface distortion이 심화하였고, 가장 취약한 sites에서 선택적으로 침식이 일어나 군데군데 작은 크레이터(crater) (즉, cracks의 발생 및 전파 또는 국부적인 파괴에 의한 변형 형태)들이 형성되었다. 이러한 작은 craters는 계속적인 충격에 의해 size가 더 큰 deep craters로 발전하였다. As-received 12Cr steel은 초기에는 주로 수 개의 고립된 hollow type의 변형을 관찰할 수 있었다(Fig. 9). 충격 횟수가 어느 이하에서는 심한 재료 손실은 일어나지 않았고 변형 양상은 연속적으로 표면 굴곡을 나타내는 ductile behavior를 나타내었다. 그러나 충격 횟수가 어느 이상이 되면 표면은 impact induced work hardening에 의해 경도가 증가하면서 변형은 crack의 발생 및 전파에 의한 brittle behavior로 변화하였고 심한 재료 손실을 초래하였다.

3-5 냉각제 변화에 따른 침식특성

Fig. 10은 12Cr steel을 1000°C에서 화염경화 한 후 냉각방법에 따른 경도 변화를 보여준다. 염수(brine)는 NaCl용액이다. 경도는 brine, water, liquid nitrogen순으로 증

가함을 볼 수 있다. 일반적으로 물이나 액체질소에 의해 급랭 할 경우 냉각과정에서 표면에 공기 막이 생성되어 공냉 효과가 나타난다. Brine의 경우에는 NaCl입자들이 시편표면에 생성된 공기 막을 깨뜨려 줌으로써 냉각속도가 빨라지게 된다. 이러한 냉각속도의 차이가 경도 차이의 원인인 것으로 사료된다.

4. 결론

현재 원자력발전소에서 사용되어 지고 있는 터빈 블레이드 재료인 12Cr steel를 가지고 화염경화처리와 액적충격침식시험을 수행한 후 다음과 결론을 얻었다.

1. 표면처리 된 12Cr steel의 시험편 표면온도가 약 900℃ 이하일 때에는 경화가 거의 일어나지 않았으며, 오스테나이트 영역인 1000℃ 이상에서 표면처리된 시편들은 마르텐사이트 변태에 의해 경화가 일어났음이 관찰되었고, 경화층 표면의 경도는 as-received 시편(300 KHN)에 비해 2배 가까이 증가한 500~600 KHN의 값을 나타냈다. 이러한 현상은, X-선 회절 분석결과 공정온도가 증가함에 따라 peak-broadening 및 격자팽창(d110의 경우 0.69%)을 나타냈는데, 시편 내부의 불균일 변형량 및 Fe 기지내로의 carbon 고용량이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

2. 다양한 냉각체를 이용하여 1000℃에서 화염경화된 시편에 대한 냉각한 결과 물, 소금물, 공기 중에서 냉각한 경우 액체질소와 오일에서 냉각한 경우에 비해 상대적으로 높은 경도를 나타냈으며, 소금물에서의 경도 값이 가장 높았다. 이러한 현상은 NaCl 입자들이 시편표면에 생성된 공기 막을 깨뜨려 줌으로써 냉각속도가 빨라지게 되는데 이러한 냉각속도의 차이가 경도 차이의 원인인 것으로 사료된다.

3. 1000℃ 이상에서 화염경화 된 시험편이 as-received시편에 비해 침식저항성이 월등히 향상되었으며 침식초기에는 연성변형을 일으키다가 침식 횟수가 증가할수록 균열 발생 및 전파에 의한 취성과괴을 보였고, 침식깊이가 급격히 증가함을 보여주었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가 지정 연구실 사업 중 원전수명 연장을 위한 원전부품 재료 손상 평가 및 방지기술훈발과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) E. Hoegger: *Brown Boveri Rev.*, 1927, vol. 14, p. 95.
- (2) O. G. Engel: *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1955 b, vol. 54, p. 283.
- (3) F. J. Heymann: *J. Appl. Phys.*, 1969, vol. 40, p. 5113.
- (4) M. K. Lee, W. W. Kim, C. H. Rhee, and W. J. Lee: *J. Nuc. Mater.*, 1998, vol. 257, p. 134.
- (5) M. K. Lee, W. W. Kim, C. H. Rhee, and W. J. Lee: *Metal. & Mater. Trans. A*, 1998, vol. 257, p. 134.
- (6) D. W. C. Baker, D. E. Elliott, D. G. Jones and D. Pearson, Proc. Int. Conf. Rain Eros., **2**, 449 (1967)
- (7) W. Herbert, Proc. Int. Conf. Rain Eros., **2**, 359 (1967)
- (8) H. Rieger, Proc. Int. Conf. Rain Eros., **3**, 147 (1970)
- (9) A. Behrendt, Proc. Int. Conf. Rain Eros., **4**, 425 (1974)
- (10) R. Araki, M. Kisimoto, K. Yoshida, JSME Int. J. **34**, 397 (1991)
- (11) J. V. Hackworth, Proc. 5th Int. Conf. on Erosion by Solid and Liquid Impact, Camvrige, England, Sep. pp.10-11 (1979)
- (12). R. I. Jaffee, Titanium steam turbine blading, Workshop proceedings, Palo Alto, California 9-10, Nov. p.371 (1988)
- (13) M. Orna and Zd. Ruml, Proc. 5th Int. Conf. on Erosion by Solid and Liquid Impact, Camvrige, England, Sep. (1979)

Table 1 Physical and mechanical properties of 12Cr steel

Compositi on (wt. %)	ρ (g/ cm ³)	Poisson ratio (ν)	Elastic Modulus(mpa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Vickers hardness (kg/mm ²)
12Cr, 0.3Mn, 0.1C, bal. Fe	7.70	0.26	217	589	765	350

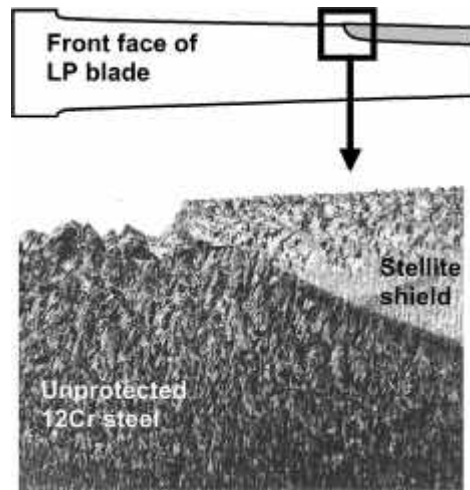


Fig. 1 Eroded surface of LP last rotating steam turbine blade



Fig. 2 Photograph of Flame Hardening Apparatus

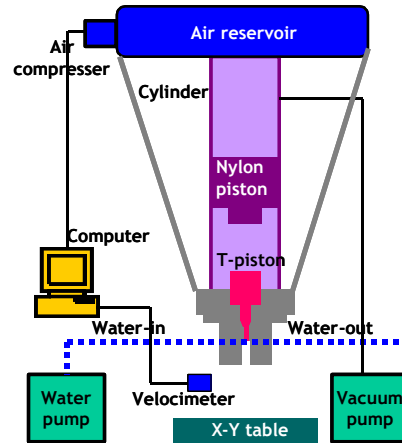


Fig. 3 Schematic diagram of liquid jet apparatus

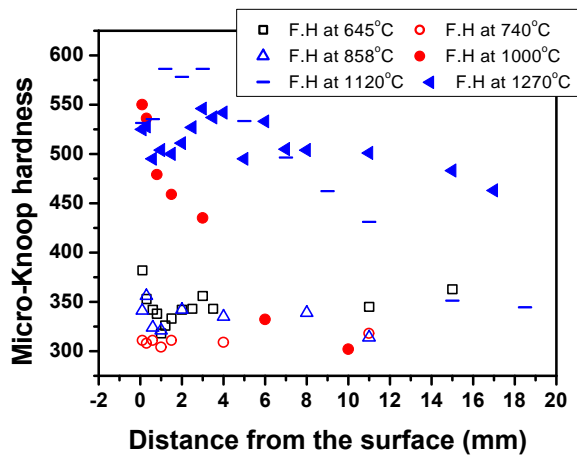


Fig. 4 Hardening characteristic of 12Cr steel as a function of flame hardening temperature

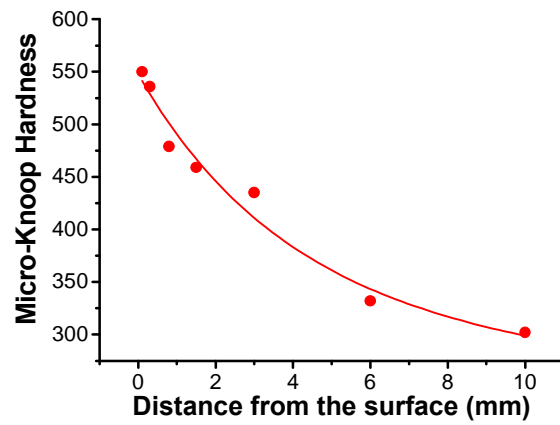


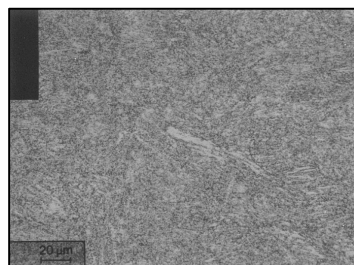
Fig. 5 Variation of Knoop micro-hardness for flame hardened 12Cr steel at 1000°C with hardened depth from specimen surface



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Microstructures of cross section from flame hardened 12Cr steel at 1000°C with hardened depth : (a) hardened depth of 0.3mm, 540KHN, (b) hardened depth of 3mm, 430KHN, (c) hardened depth of 8mm, 330KHN

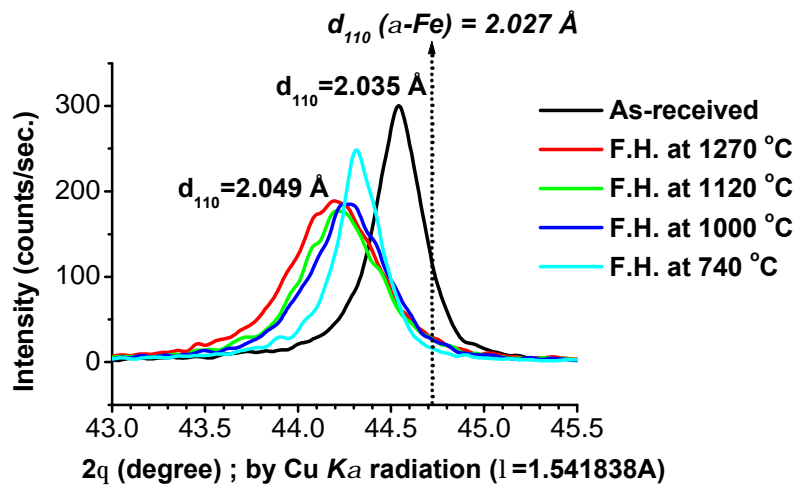


Fig. 7 X-ray normal $\theta - 2\theta$ diffraction patterns of 12Cr steel with flame hardening temperature

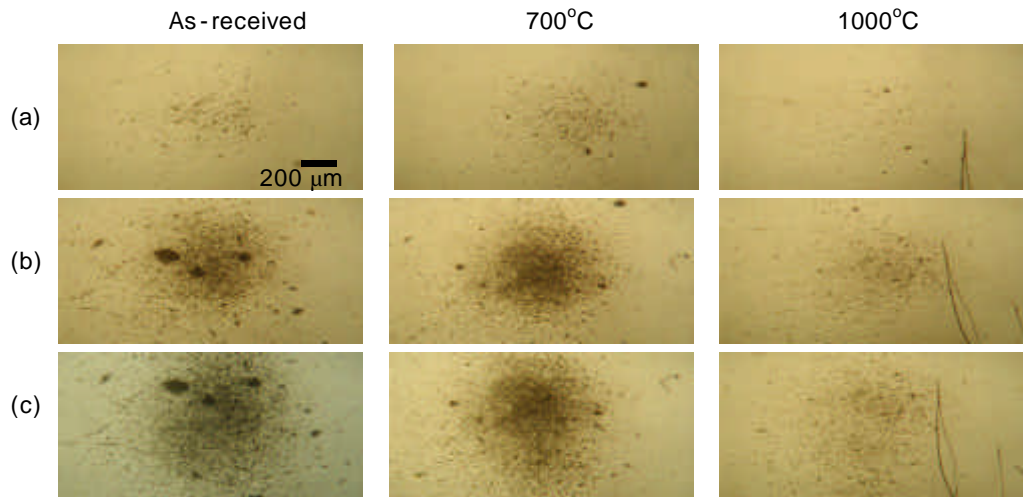


Fig. 8 Development of erosion damage in 12Cr steel with increasing impact number at a velocity of 350 ± 20 m/s : (a) 5, (b)30, (c) 50

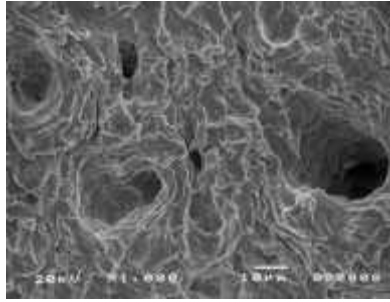


Fig. 9 Scanning electron micrograph showing the craters created on 12Cr steel after 30 impacts at a velocity of 350 ± 20 m/s

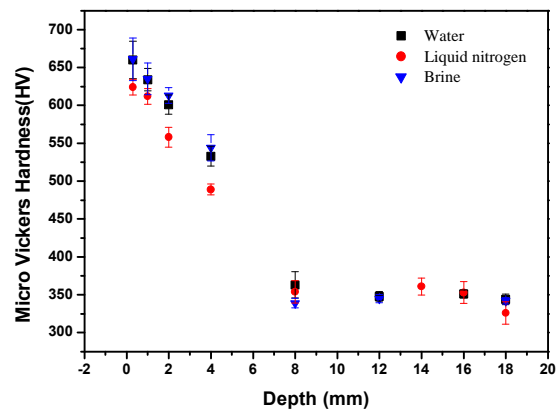


Fig. 10 Hardening characteristic of 12Cr steel as a function of cooling agent